

# 京都・滋賀水害調査最終報告書

土木学会水工学委員会

2014年5月

# 目次

「粒子フィルタと二次元不定流モデルを用いた 2013 年台風 18 号による桂川の洪水流量の推定」・・・1 立川康人・キムヨンス・萬和明・キムスンミン
「京都・滋賀における 2013 年台風 18 号の豪雨の特徴と桂川流域被害調査」・・・5 角哲也・田中茂信・本間基寛
「台風 18 号による亀岡市中心部の浸水状況」・・・19 堀智晴
「平成 25 年台風 18 号による水害が京都府産アユモドキ個体群に及ぼした影響」・・・21 岩田明久
「H25 年度 京都水害報告書」・・・24 岡本隆明・戸田圭一
「2013 年 9 月京都・滋賀水害調査」・・・27 竹林洋史
「2013 年台風第 18 号による由良川氾濫調査報告」・・・37 三輪浩・川合茂

## 土木学会水工学委員会京都・滋賀水害調査団団員

団 長：中川 一（京都大学）

副団長：藤田一郎（神戸大学）

幹事長：竹林洋史（京都大学）

団 員：道奥康治（神戸大学）

堀 智晴（京都大学）

田中茂信（京都大学）

戸田圭一（京都大学）

中北英一（京都大学）

角 哲也（京都大学）

三輪 浩（舞鶴高専）

里深好文（立命館大学）

立川康人（京都大学）

川池健司（京都大学）

小林健一郎（神戸大学）

山口弘誠（京都大学）

萬 和明（京都大学）

岡本隆明（京都大学）

本間基寛（京都大学）

富田邦裕（建設環境研究所）

叶 正興（建設環境研究所）

浜野恒二（建設環境研究所）

木下長則（建設環境研究所）

山崎俊哉（建設環境研究所）

特別団員：岩田明久（京都大学）

# 粒子フィルタと二次元不定流モデルを用いた 2013年台風18号による桂川の洪水流量の推定

ESTIMATION OF FLOOD DISCHARGE AT KATSURA RIVER FOR TYPHOON 18  
IN 2013 USING PARTICLE FILTER AND 2D-FLOOD ROUTING MODEL

立川 康人<sup>1</sup>・キム ヨンス<sup>2</sup>・萬 和明<sup>3</sup>・キム スンミン<sup>4</sup>  
Yasuto TACHIKAWA, Yeonsu KIM, Kazuaki YOROZU, Sunmin KIM

- <sup>1</sup>正会員 博(工) 京都大学 教授 大学院工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1)  
<sup>2</sup>正会員 博(工) 京都大学 研究員 大学院工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1)  
<sup>3</sup>正会員 博(工) 京都大学 助教 大学院工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1)  
<sup>4</sup>正会員 博(工) 京都大学 准教授 大学院工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1)

## 1. はじめに

洪水流量の推定は、一般に水位流量曲線が用いられる。高水部の流量観測の機会が少ないため、これまでに経験のない大洪水の流量を推定する場合は水位流量曲線を外挿して用いることになり、相当の誤差を伴う可能性がある。今回の洪水では流観による流量測定は、ピーク流量付近では実施されていない。そこで、Kim *et al.*<sup>1)2)</sup>、キムら<sup>3)</sup>による粒子フィルタと平面二次元モデルを用いた逐次推定手法を用いて、2013年9月台風18号による洪水流量ハイドログラフを推定した。対象河川は、淀川水系の桂川で天竜寺水位観測所から羽束師水位観測所までの約12.8km(図-1の赤線)である。

## 2. 推定手法の概要

天竜寺地点、桂地点、羽束師地点の観測水位データのみを用いて、河川区間上端流入量と側方流入量、粗度係数を逐次同時推定する<sup>3)</sup>。図-2に推定手法の概要を示す。



図-1 淀川水系の桂川流域および対象河道区間 (天竜寺水位観測所から羽束師水位観測所)

羽束師地点の観測水位データを下流端の境界条件とし、天竜寺地点、桂地点の観測水位は推定計算には利用せずに、計算値が観測値とどれだけ近い値かを示す尤度を計算するために用いる。この尤度は粒子フィルタを適用する際に用いる。図-3に示すように平面二次元モデルを構成し、対象河道を低水路、高水敷、植生域に区分する。被覆区分ごとに粗度係数は一定とし、それぞれの値を粒子フィルタを用いて推定する。また、対象河川区間上端からの流入量、天竜寺地点から桂地点および桂地点から羽束師地点の間の側方流入量を同時推定の対象とする。

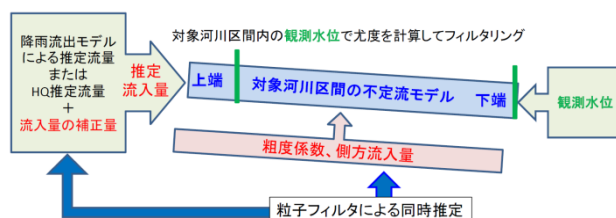


図-2 粒子フィルタを用いた逐次推定手法の概要

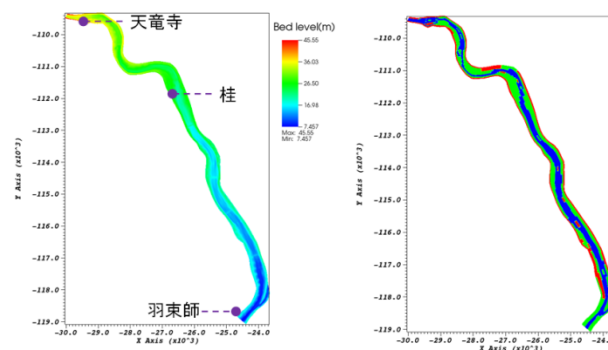


図-3 計算格子の地形の標高 (天竜寺水位観測所から羽束師水位観測所) と空中写真による各格子の被覆区分 (青色: 低水路, 緑色: 高水敷, 赤色: 植生域)

計算格子(図-3左)の設定には国土交通省近畿地方整備局から提供された河道横断面データを用いた。河道の平面的な被覆状態は空中写真を用いて判別し、それぞれの計算格子を低水路と高水敷、植生域に分類した(図-3右)。

### 3. 粒子フィルタ

粒子フィルタ(Particle filters, PFs)は観測データに基づく状態ベクトルの条件付き確率分布を多数の粒子で近似的に表現し、ベイズの定理を応用してその時間推移を数値的に評価する推定手法である<sup>4)</sup>。粒子とはここでは一つの二次元不定流モデルを意味し、多数の粒子を準備して、粒子ごとに異なる上端流入量や粗度係数を設定する(図-4)。この各粒子に設定する重みを、観測水位を用いて逐次更新する。重みが小さな粒子は計算を中止し、その分、重みに比例して粒子を複製し推定計算を繰り返す。具体的には各粒子の尤度を式(1)で計算し、その値を用いて各粒子に対する正規化した重みを式(2)を用いて計算する。

$$w_t^{i,k} = R(z_t^k | x_t^{i,k}) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x_t^{i,k} - z_t^k)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1)$$

$$\tilde{W}_t^i = w_t^{i,1} w_t^{i,2} / \sum_{j=1}^N w_t^{j,1} w_t^{j,2} \quad (2)$$

ここに、 $z_t^k$ は時刻  $t$  の地点  $k$  での観測水位、 $x_t^{i,k}$ は各粒子  $i$  の計算水位、 $\sigma$ は尤度関数のパラメータである。 $w_t^{i,k}$ を天竜寺観測所(地点1)と桂観測所(地点2)で計算し、二地点での観測値を基に総合的な各粒子の重み $\tilde{W}_t^i$ を求める。また、各粒子の重みによって、有効な粒子の数を確認するために有効サンプルサイズ(Effective sample size, ESS)を計算する。

$$ESS = 1 / \sum_{i=1}^N (\tilde{W}_t^i)^2 \quad (3)$$

全粒子の重みが等しい場合、ESSの値は総粒子数  $N$  になり、特定の粒子の重みが大きくなると1に近づく。ここでは  $ESS/N$  の値が0.5以上のときはリサンプリングを実施しないSIS(Sequential Importance Sampling)アルゴリズムを、0.5以下となった場合にリサンプリングを実施するSIR(Sampling Importance Resampling)アルゴリズムを適用する。(2)式による各尤度の結合確率のESSだけでなく、各地点のESSも計算して、合計3つのいずれかのESSが0.5以下に低下した場合に、SIRアルゴリズムを適用した。

### 4. 二次元不定流計算モデル

河川流れへの地形形状および被覆の影響を考慮するために二次元不定流計算モデルを用いる。基礎式は平面二

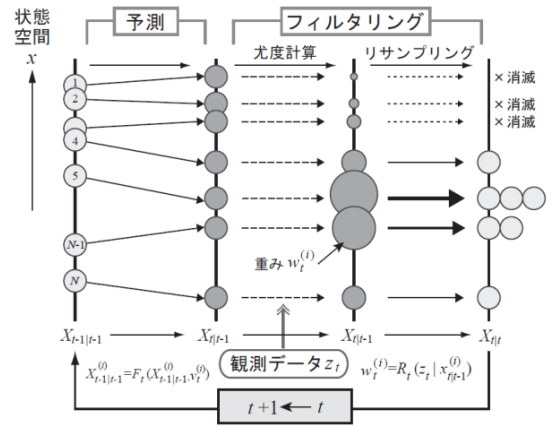


図-4 粒子フィルタ<sup>4)</sup>。観測値に応じて粒子の重みを更新し、重みに比例させて粒子を複製し推定計算を繰り返す。

次元流れの連続式と運動方程式である。デカルト座標系で表示すれば、以下のようである<sup>5)</sup>。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial uM}{\partial x} + \frac{\partial vM}{\partial y} = -gh \frac{\partial z_s}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x}(-\overline{u^2}h) + \frac{\partial}{\partial y}(-\overline{u}v h) \quad (5)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial uN}{\partial x} + \frac{\partial vN}{\partial y} = -gh \frac{\partial z_s}{\partial x} - \frac{\tau_{by}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x}(-\overline{u}v h) + \frac{\partial}{\partial y}(-\overline{v^2}h) \quad (6)$$

ここに、 $t$ は時間、 $x, y$ は空間座標、 $u, v$ は $x, y$ 方向の水深平均流速、 $M, N$ は $x, y$ 方向の流量フラックス、 $g$ は重力加速度、 $h$ は水深、 $\rho$ は水の密度、 $z_s$ は基準面からの水位、 $\tau_{bx}, \tau_{by}$ は $x, y$ 方向の面せん断応力の成分、 $\overline{u^2}, \overline{v^2}, \overline{u}v$ は $x, y$ 方向の水深平均レイノルズ応力である。数値解析法としては長田<sup>5)</sup>を参考にし、移流項の離散化には一次精度の風上差分を用い、時間積分にはAdams-Bashforth法とEuler法を用いる。

### 5. 適用と考察

#### (1) 初期条件とノイズの設定

粒子の個数を256個とし、粒子 $P_i$ の推定対象を次のように設定した。 $i$ は粒子の識別番号である。

$$P_i = P_i(n_{main}, n_{flood}, n_{veg}, q_{up}, q_{lat1}, q_{lat2}) \quad (7)$$

括弧内の変数は、個々の粒子で異なる値を設定するパラメータであり、推定の対象とするパラメータである。左から低水路、高水敷、植生域の粗度係数、上流端流入量、天竜寺から桂までの側方流入量、桂から羽束師までの側方流入量であり、粒子ごとに異なる値を設定して各時刻の観測水位を用いて逐次推定する。

初期設定として低水路、高水敷、植生域の粗度係数をそれぞれ0.02~0.04、0.03~0.07と0.03~0.07とした。対象河川区間上端の初期流量は、2011年洪水の推定計算

で得た水位流量曲線を用いて水位から流量を設定した。側方流入量は、上流端の流域面積と各区間に寄与する流域面積の比率（天龍寺から桂までは上流端流域面積の8%、桂から羽束師は15%）を上流端の初期流量に乗じた値とした。下流端条件である羽束師地点の水位は、観測誤差を考慮して式(8)のように観測ノイズを入れて与えた。

$$h_{t+1}^{down,i} = h_{t+1}^{down,obs} + \varepsilon_{t+1}^i, \varepsilon_{t+1}^i \sim N(0, 0.05^2) \quad (8)$$

前節で説明したように、ESS/N が0.5以上になった時、すなわち、SISアルゴリズムを適用する場合は、粗度係数は現在ステップの値で固定し、上端流量は現在ステップの各粒子の値と初期流量の比を用いて次の各粒子の初期流量の値を決めた。

SIRアルゴリズムを適用する場合は、現在時刻の各変数の分散を考慮してノイズを付加する。上流端の流量と側方流入量は、現在時刻の標準偏差が平均値の20%を超える時、分散を減少させる1以下のパラメータ  $\beta$  を導入して<sup>6)</sup>、式(9)および式(10)のようにノイズを付加した。粗度係数は現在時刻の標準偏差が0.002以上の場合、式(11)を適用した。上とは逆の場合、すなわち状態量の分散が一定の値より小さくなる場合は、流量は現在時刻の平均値の10%を標準偏差とする正規分布に従うノイズを設定した。粗度係数は、0.002を標準偏差とする正規分布に従うノイズを付加した。

$$Q_{t+1}^i = Q_t^i \frac{q(h_{t+1}^{obs})}{q(h_t^{obs})} + \varepsilon_{t+1}^i, \varepsilon_{t+1}^i \sim N(0, (\beta\sigma_t^Q)^2) \quad (9)$$

$$Q_{lat,t+1}^i = Q_{lat,t}^i \frac{q(h_{t+1}^{obs})}{q(h_t^{obs})} + \varepsilon_{t+1}^i, \varepsilon_{t+1}^i \sim N(0, (\beta\sigma_t^{LQ})^2) \quad (10)$$

$$n_{t+1}^i = n_t^i + \varepsilon_{t+1}^i, \varepsilon_{t+1}^i \sim N(0, (\beta\sigma_t^n)^2) \quad (11)$$

ここに、 $Q_{t+1}^i$ 、 $Q_{lat,t+1}^i$ 、 $n_{t+1}^i$ 、 $h_{t+1}^{down,i}$  は時刻  $t+1$  での  $i$  番目の粒子の上流端流量、側方流入量、粗度係数と下流端水位、 $\sigma_t^Q$ 、 $\sigma_t^{LQ}$ 、 $\sigma_t^n$  は時刻  $t$  の上流端流量、側方流入量と粗度係数の標準偏差、 $\beta$  は0.1、 $N$  は正規分布を表し、 $q(h_t^{obs})$  は水位流量関係式で変換した上流端の初期推定流量である。

## (2) 適用結果

図-5に推定計算(リサンプル前の予測計算)の結果を示す。(a)と(b)は推定した各粒子の水位(赤点)、粒子の重み付平均水位(黒線)と観測水位(黒点)であり、水色と黄色はそれぞれ粒子の70%区間幅、90%区間幅を表す。重み付平均水位と観測水位はよく一致し、開発した手法が適切に機能していることがわかる。

(c)と(d)は流量の推定結果と観測値とを比較したものである。流量観測値は流速測定から得られた流観値である。2013年9月の台風18号洪水では途中から流観値は存在しないが、流観値と流量の重み付き平均値はよく一致している。本手法による天龍寺地点と桂地点のピーク流量の重み付平均値は、それぞれ2,823m<sup>3</sup>/sと3,025m<sup>3</sup>/s

となった。また、それぞれの70%区間と90%区間の上下限値は表-1のようになった。

(e)は推定した低水路の粗度係数の時間変化である。重み付平均値は0.024から0.027であり洪水期間中は大きな変動はなく、国土交通省近畿地方整備局<sup>7)</sup>による逆算粗度(6.8~12.2km区間で0.027)とよく対応した。(f)は天龍寺地点から桂地点の間の側方流入量の推定結果である。直接比較できる資料はないが、側方流入量を推定対象に入れることで桂地点での流量の推定精度の向上に寄与すると考えた。

表-1 推定した2013年台風18号洪水の平均値からの上下限値

推定区間	ピーク流量	70%区間	90%区間
天龍寺地点	2,823m <sup>3</sup> /s	上+18%, 下-13%	上+27%, 下-20%
桂地点	3,025m <sup>3</sup> /s	上+13%, 下-7%	上+18%, 下-15%

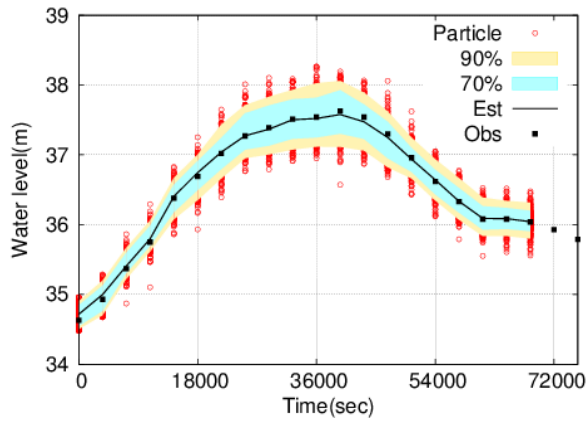
## 6. おわりに

粒子フィルタと二次元不定流計算モデルとを組み合わせた逐次推定手法により、2013年9月台風18号による洪水流量を推定した。その結果、天龍寺地点でのピーク流量は約2,800m<sup>3</sup>/s 桂地点のそれは約3,000m<sup>3</sup>/sとなった。本手法は複数地点の水位観測データを用いて、河道上端からの流入量、側方流入量、粗度係数を同時に推定する手法であり、流量観測値のない流量推定や水位流量曲線の推定に利用できる。他の河川に適用して適用性を検討していきたい。

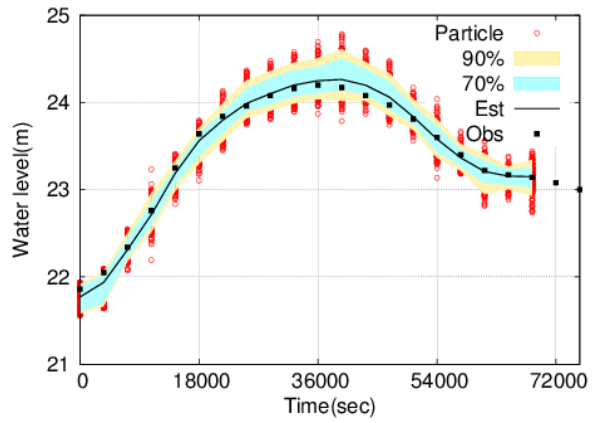
謝辞：本研究で用いた水理・水文データは国土交通省近畿地方整備局から提供を受けた。また、本研究を実施するにあたり、国土交通省河川砂防技術研究開発公募(水防災技術分野)の補助を受けた。記して謝意を表す。

## 参考文献

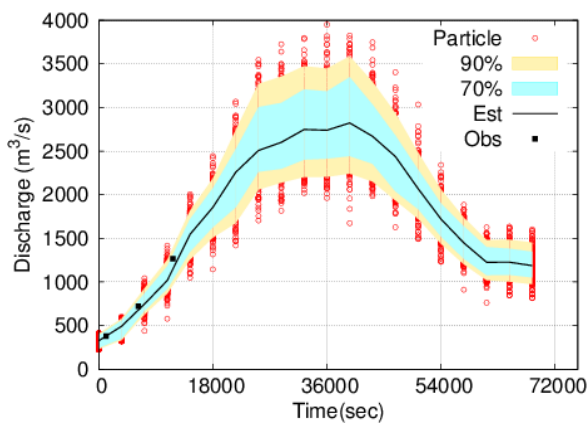
- Kim, Y., Y. Tachikawa, M. Shiiba, S. Kim, K. Yorozu, and S. Noh: Simultaneous estimation of inflow and channel roughness using 2D hydraulic model and particle filters, *Journal of Flood Risk Management*, 6(2), pp. 112-123, 2013.
- Kim, Y., Y. Tachikawa, S. Kim, M. Shiiba, K. Yorozu, and S. Noh: Estimating the 2011 largest flood discharge at the Kumano river using a 2D dynamic wave model and particle filters, *Journal of Japan Society Civil Engineers*, 69(4), pp. I\_163-I\_168, 2013.
- キムヨンス, 立川康人, 萬和明, キムスンミン: 粒子フィルタと洪水追跡モデルを用いた水位流量曲線の作成および補正手法の開発, 河川技術論文集, 20, pp. 361-366, 2014.
- 樋口知之: 予測にいかす統計モデリングの基本, 講談社, 2011.
- 長田信寿: 一般座標による河川流の計算, 水理公式集例題プログラム集, 土木学会, CD-ROM, 例題2-08, 2002.
- Moradkhani, H., K.-L. Hsu, H. Gupta, and S. Sorooshian: Uncertainty assessment of hydrologic model states and parameters: Sequential data assimilation using the particle filter, *Water Resour. Res.*, 41, W05012, doi:10.1029/2004WR003604, 2005.
- 国土交通省近畿地方整備局: 淀川水系河道技術資料(桂川編), 2008.



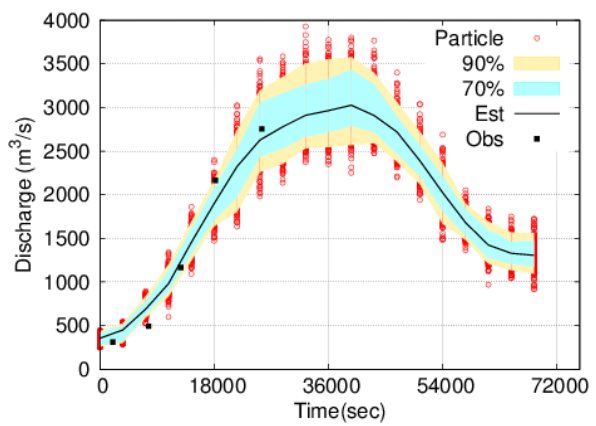
(a) 推定水位と観測水位(天竜寺)



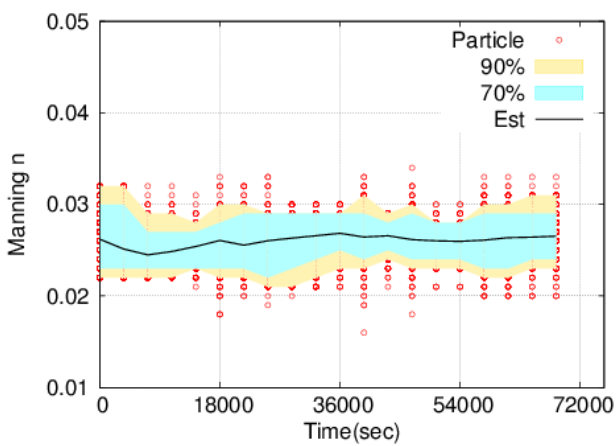
(b) 推定水位と観測水位(桂)



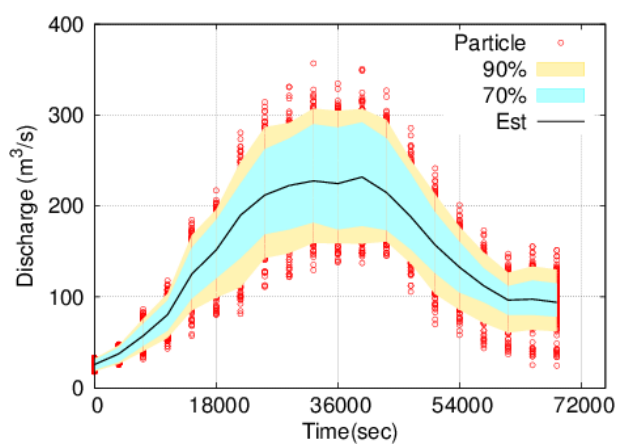
(c) 推定流量と観測流量(天竜寺)



(d) 推定流量と観測流量(桂)



(e) 推定した粗度係数(低水路)



(f) 推定した側方流入量(天竜寺から桂の区間)

図-5 各粒子が計算した推定値. すべての図において, 赤丸は粒子に各によって計算した値であり, 赤丸で示す値の90%区間, 70%区間をそれぞれ黄色と水色で示す. 黒線は赤丸の値の各時刻での重み付平均値を連ねたものである.

# 京都・滋賀における2013年台風18号の 豪雨の特徴と桂川流域被害調査

角哲也<sup>1</sup>・田中茂信<sup>2</sup>・本間基寛<sup>3</sup>

Tetsuya SUMI, Shigenobu TANAKA, Motohiro HONMA

<sup>1</sup>正会員 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)  
<sup>2</sup>正会員 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)  
<sup>3</sup>正会員 博(工) 京都大学助教 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

## 1. はじめに

2013年9月13日3時に小笠原諸島近海で発生した台風第18号は、発達しながら日本の南海上を北上し、14日9時に強風域の半径が500kmを超えて大型の台風となり、15日18時には暴風域を伴った。台風は、その後も北上を続け、潮岬の南海上を通過して、16日8時前に暴風域を伴って愛知県豊橋市付近に上陸した。その後、台風は速度を速めながら東海地方、関東甲信及び東北地方を北東に進み、16日21時に北海道の東で温帯低気圧となった<sup>1)</sup>。

台風の接近・通過に伴い、日本海から北日本にのびる前線の影響や、台風周辺から流れ込む湿った空気の影響、台風に伴う雨雲の影響で、四国から北海道の広い範囲で大雨となった。9月15日から16日までの総雨量は、三重県宮川村で575.5mm、奈良県上北山で542.5mmとなるなど、近畿、東海地方を中心に400mmを超えた。京都府、滋賀県、福井県では、その地域ではこれまでに経験したことがないような大雨が降ったとして、大雨特別警報が発表された<sup>1)</sup>。

この大雨等により、岩手県、福島県、福井県、滋賀県、三重県、兵庫県であわせて死者6名、行方不明者1名となり、四国から北海道までの広い範囲で損壊家屋1,600棟以上、浸水家屋1万棟以上の住家被害が生じた<sup>2)</sup>。

本稿では、京都府及び滋賀県を対象に、豪雨の特徴を整理するとともに、土木学会水工学委員会・関西支部合同の京都・滋賀水害調査団として9月18日に実施した桂川流域被害調査の結果をまとめる。

## 2. 京都・滋賀における豪雨の特徴

### (1) 台風の経路と雨量分布

9月15～16日の天気図と解析雨量分布図を図-1に示す。台風第18号は、日本の南海上を時速30kmとゆっくりとした速度で北上し続けたため、前線や台風に伴う雨雲が居座り、長時間にわたって強い雨が降り続いた。

9月15日0時から16日24時までの近畿地方における総降水量分布図を図-2に示す。この台風では、紀伊半島の南東斜面で総降水量が500mmを超えている地域が多く見られるとともに、近畿地方北部でも一部で総降水量が

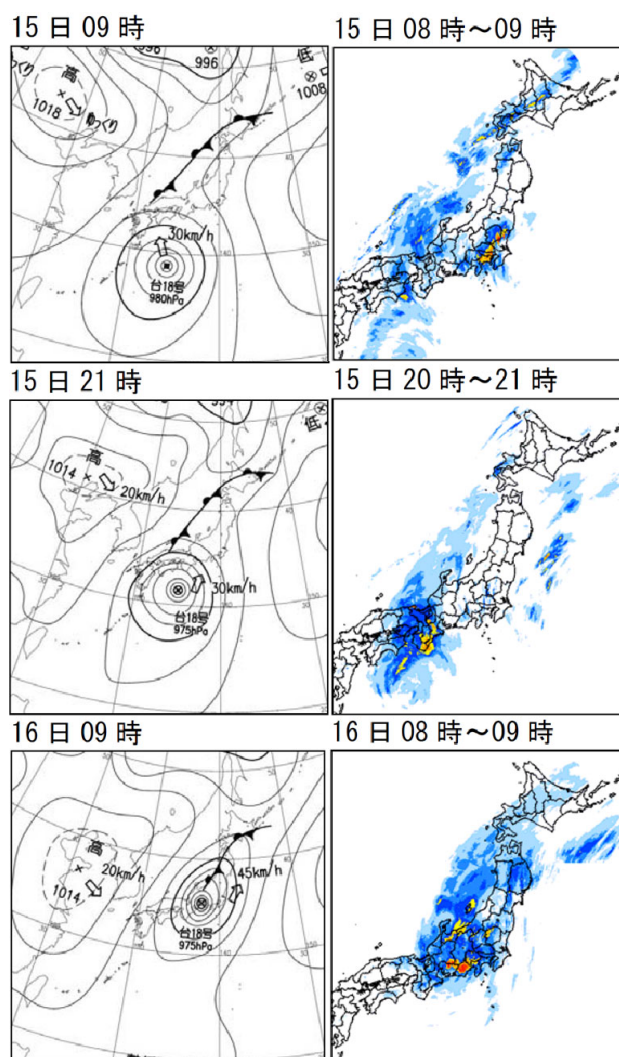


図-1 2013年9月15～16日の天気図と解析雨量図<sup>1)</sup>



500mmを超えていることが特徴である。

台風が北上していた9月14日の日本近海での海面水温

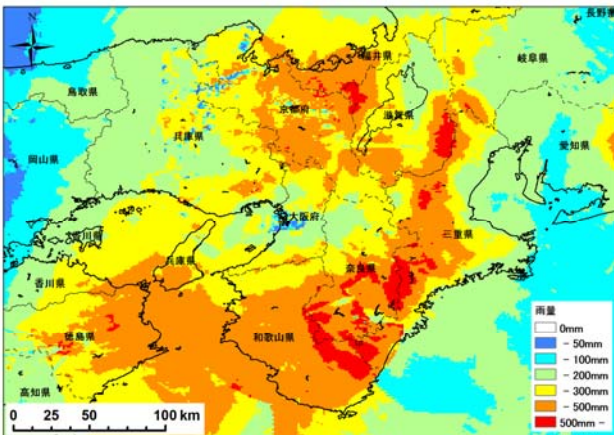


図-2 9月15日0時～16日24時までの総降水量分布図（データ提供：国土交通省近畿地方整備局）

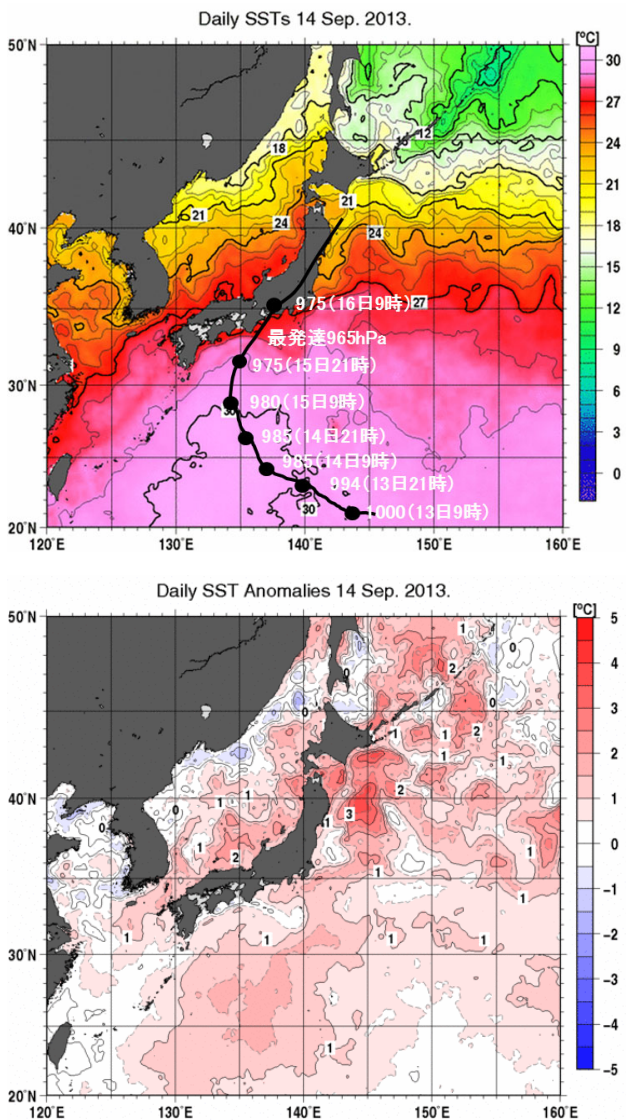


図-3 2013年9月14日の海面水温分布図（上）と平年値からの偏差の分布図（下）<sup>3)</sup>。台風経路は筆者が加筆。

とその平年値からの偏差の分布図を図-3に示す。日本の南海上では、海面水温が28℃以上となっており、平年よりも1℃以上高い状態となっていた。通常、台風は北緯30度以上の中緯度帯に入ると勢力が衰えながら北上するが、台風第18号では北緯30度付近を越えてからも発達を続け、日本上陸の直前に中心気圧が965hPaと最発達した。その結果、台風が強い勢力を保持した状態で上陸したため、台風北側での大雨につながったものと考えられる。

また、今回の台風では、紀伊半島の太平洋側に比べて、通常は降水量が少ない日本海側でも降水量が多くなった（図-2）。図-3に示すように、9月14日の時点では、日本海南部でも海面水温が26℃近くで、平年よりも2℃以上高い状態となっていた。図-4は、9月15日21時の大気下層での気流と水蒸気量の分布である。近畿地方北部では紀伊半島からの東暖湿流と日本海からの北東暖湿流が流入していることがわかる。通常、日本海南部では海面水温が低いいため大気中に含まれる水蒸気量は少ないが、今回の豪雨では、日本海南部からも大量の水蒸気が流入し、地形による効果及び南東からの暖湿流との収束によって持ち上げられ、大雨になったと考えられる<sup>4)</sup>。

## (2) 降水量の推移

京都府内及び滋賀県内の主な地点における1時間降水量と累積降水量の推移を図-5に示す。地点は全て、気象庁AMeDAS観測所である。雨は15日未明から降り始め、15日4時から10時頃にかけて、最初の小さなピークを迎えている。その後、15日夕方頃から雨脚が再度強くなり、京都府内の各地点や滋賀県東部の大津、朽木平良、今津では、16日未明に1時間雨量のピークを迎えている。滋賀県西部の彦根、土山、信楽では、16日明け方頃に1時

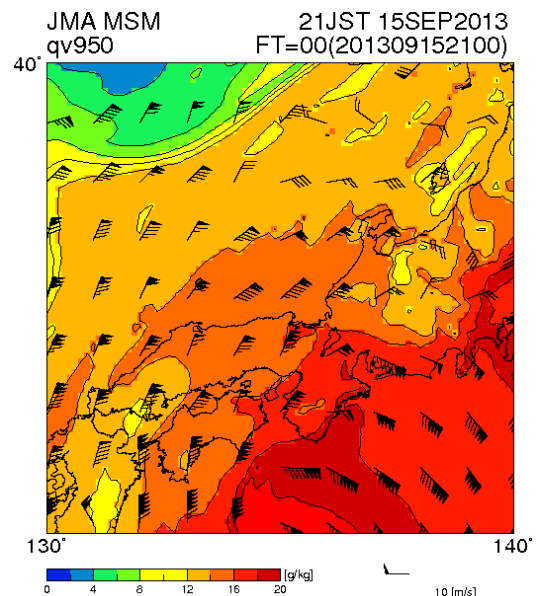


図-4 2013年9月15日21時の大気下層での気流と水蒸気量の分布 気象庁MSMのデータを図化。（京都大学防災研究所竹見哲也氏提供）

間雨量のピークを迎えている。ピーク雨量は各地点とも30~40mm程度であったが、15日20時前後から16日8時前後までの12時間程度にわたって、10mm/h以上の降水が続いていた。

各地点の累積降水量も図-5に示している。滋賀県の朽木平良では500mm近くに達している他、多くの地点で300mm前後の降水量となっている。

### (3) 過去の降水記録との比較

今回の台風では、京都府内及び滋賀県内の気象庁AMeDAS観測所(統計機関10年以上)で24時間降水量の

年最大値を更新した地点が15地点(京都府:宮津, 睦寄, 本伏, 美山, 須知, 園部, 京北, 長岡京, 京田辺, 滋賀県:今津, 南小松, 近江八幡, 大津, 信楽, 土山), 48時間降水量の年最大値を更新した地点が13地点(京都府:睦寄, 美山, 須知, 園部, 京北, 京田辺, 滋賀県:今津, 南小松, 近江八幡, 東近江, 大津, 信楽, 土山)であった。

美山, 園部, 京都, 大津, 朽木平良, 土山の6地点を対象に, 降水継続時間毎の最大降水量について1976年以降の最大値(以下, 既往最大値と称す)と比較したDD解析図(Depth-Duration解析図)を図-6に示す。累積降

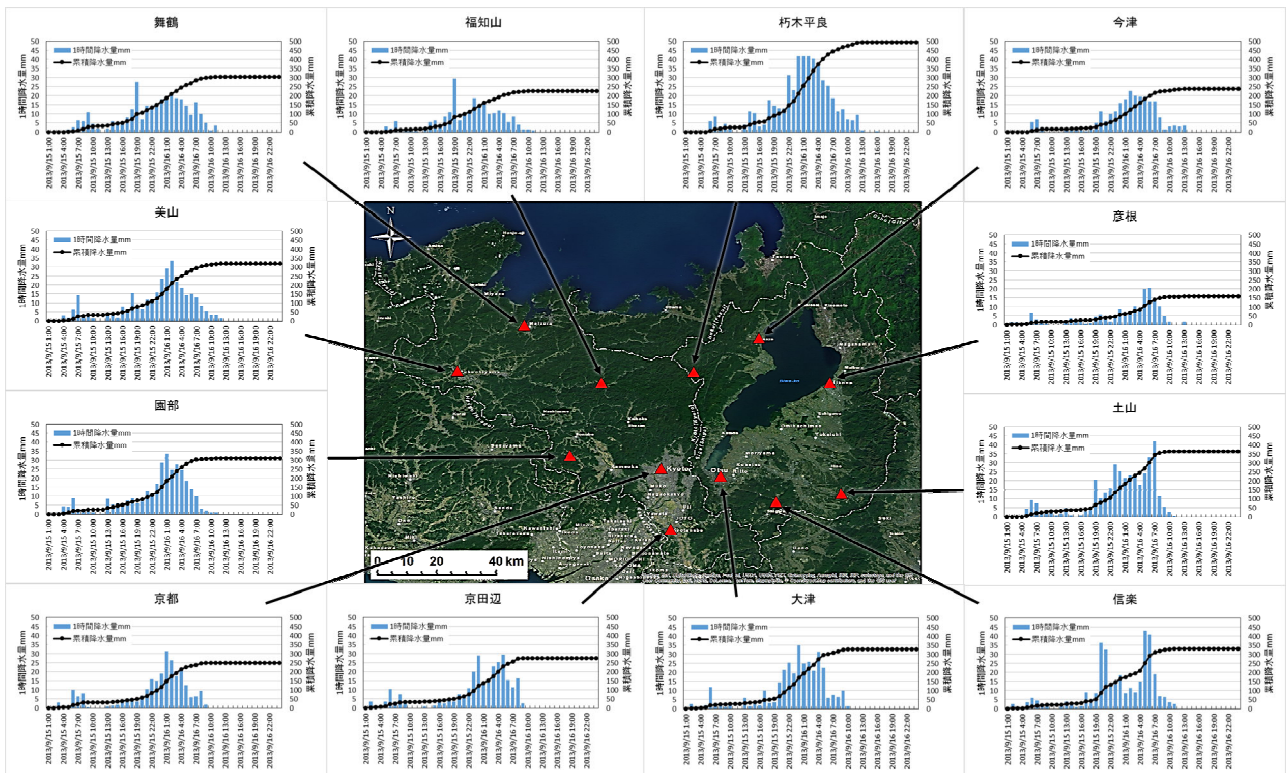


図-5 京都府内及び滋賀県内の主な地点における1時間降水量と累積降水量の時系列

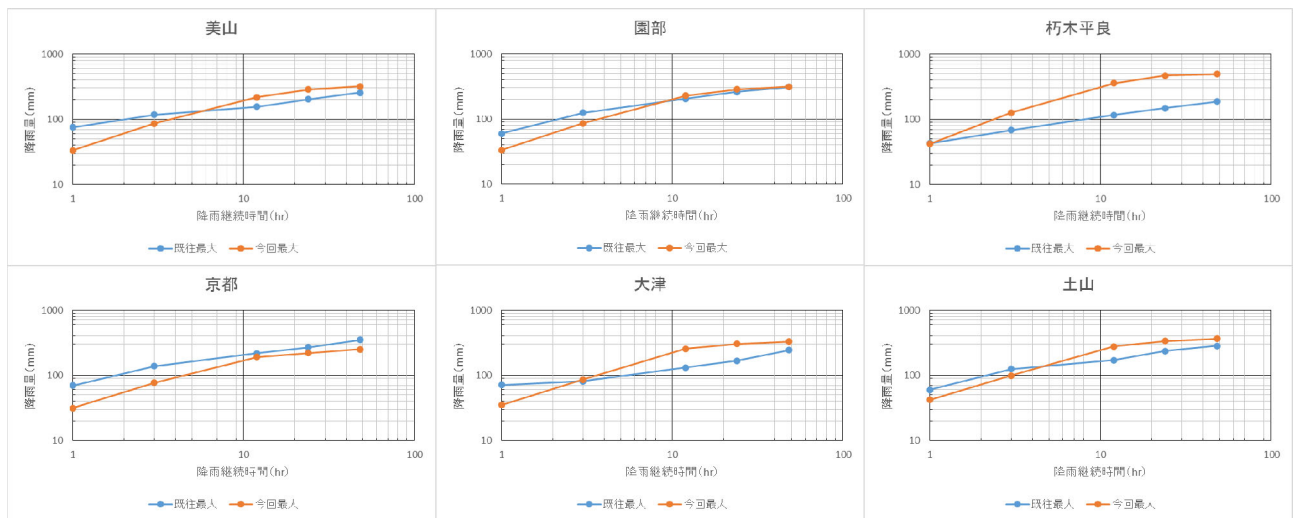


図-6 降水継続時間と最大降水量の関係

水量が500mm近くに達した朽木平良では、3、12、24、48時間降水量が既往最大値を大きく超えていたが、1時間降水量は既往最大値と同程度であった。美山、園部、大津、土山では、12、24、48時間降水量が既往最大値以上となったが、1、3時間降水量は既往最大値以下であった。京都では、いずれの時間降水量も既往最大値以下ではあったが、12、24、48時間降水量は既往最大値に近い降水量であった。このように、今回の事例では短時間の降水量は既往最大値を下回る降水量であったが、12、24、48時間降水量は既往最大値に匹敵またはそれを上回る降水量となっており、やや強い雨が長時間にわたって降り続いたことが特徴である。

### 3. 日吉ダムおよび淀川流域主要地点等における流域平均降水量と流量の確率評価

淀川流域内の日吉ダムおよび基準地点枚方および主要地点5点における降水量および流量の資料を収集した。各地点の位置図を図-7に、各地点上流流域面積を表-1に示す。これらの地点上流流域平均降水量は1952年から蓄積されているが、日吉ダムを除く地点は2004年までの資料と2013年台風18号時の暫定値である。なお、淀川の洪水対策では琵琶湖からの洪水時の放流量を $0\text{m}^3/\text{s}$ としているので、枚方の流域面積に対する割合については表-1の括弧書きの数値を用いる。また、流量は上流のダムが無い場合の計算流量である。

#### (1) 日吉ダム

日吉ダムは桂川上流に位置する多目的ダムであり、(独)水資源機構が1998年4月より管理開始している。9月18日、国土交通省近畿地方整備局と(独)水資源機構は共同で、「日吉ダム(南丹市日吉町)流域では、9月16日0時から1時までの1時間の雨量が最大34.5mmを記録し、降り始めの9月15日2時から16日17時までの総雨量は345mmに達した」と発表しており、管理開始以来最大のダム流入量 $1,694\text{m}^3/\text{s}$ を記録している<sup>6)</sup>。ダムの計画は2日雨量349mmであるので、総雨量は計画にほぼ匹敵する量であったと考えられる。

(独)水資源機構によると、ダム流域内外含め建設前から現在まで28カ所の観測所で断続的に降水量観測が行われているが、時点毎に利用可能な観測所の資料を用いてティーセン法により流域平均降水量が求められている。日吉ダムの計画が2日降水量で検討されていることから、2日降水量を対象とし、経年変化特性を評価するとともに年最大値資料(AMS)と閾値超過資料(POT)を用いた確率評価を行う。

#### a) 経年変化特性

図-8に流域平均の2日降水量の年最大値の経年変化を示す。1960年ころにいくつか大きな降水を経験しているが、それ以降、2013年の台風18号まで300mmを超えるも

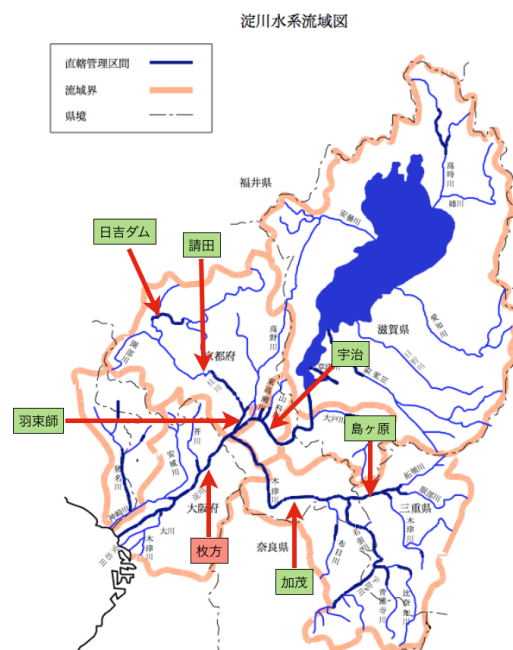


図-7 日吉ダムおよび淀川流域の基準地点と主要地点

表-1 資料収集地点の上流流域面積

地点	上流流域面積 (km <sup>2</sup> ) (琵琶湖除き)	基準点枚方の流域面積に対する割合(%)
日吉ダム	290	8
請田	728	21
羽束師	1,077.9	31
宇治	4227 (379)	11
島ヶ原	522.9	15
加茂	1,478.1	42
枚方	7,339.5 (3,491.5)	100

のは見られない。この時系列についてMann-Kendall検定を行ってみると5%有意水準では独立で同一の確率分布にしたがうと判断されるが、若干、減少傾向である。図-9は流域平均の2日降水量が100mmを超えるイベントの年毎の回数の経年変化をプロットしたものである。全期間で見ると年最大値と同様の結果が得られる。

なお、AMeDAS観測が開始された1976年以降の資料のみを用いた同検定では、流域平均の2日降水量の年最大値および100mmを超えるイベントの回数とともに5%有意水準でみると独立で同一の確率分布にしたがうと判断されるが、若干、増加傾向にある。

#### b) 年最大値系列(AMS)を用いた確率評価

図-11に年最大2日降水量をグンベル確率紙にプロット

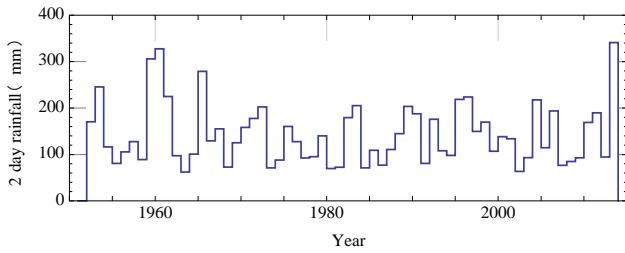


図-8 日吉ダム流域平均年最大2日降水量の経年変化

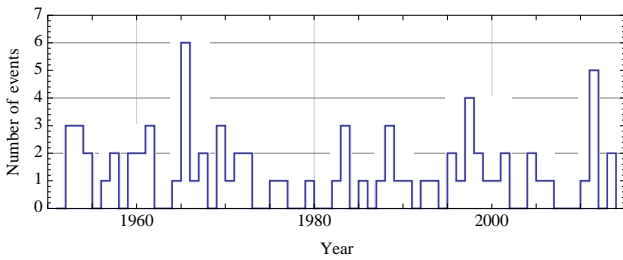


図-9 2日降水量が100mmを超えるイベント数の経年変化

し、あわせてグンベル分布、一般化極値分布(GEV)をL積率法により母数推定し当てはめた分布曲線を示す。SLSCはグンベル分布0.029、GEV0.027でGEVの方が若干適合度が高いと判断される。しかしながら、年最大値系列の中でも上位の資料が上限を有するような並びとなっている傾向とはGEVは異なり、リターン期間が大きくなるとより大きな確率水文量を与えるTailの厚い分布曲線となっている。この原因としては、年最大値系列の中でも上位の資料が上限を有するような並びでプロットされているにもかかわらず、サンプルサイズの約1/4を占めている2日降水量約90mm以下の下位の資料がほぼ同様な値となっていて中上位の部分と傾向を異にし、上に凸の形状での当てはめになっているものと考えられる。

1/100確率水文量はグンベル分布354mm(jackknife推定値も同値)、GEV389mm(jackknife推定値387mm)であり、グンベル分布およびGEVで今回の345mmを評価するとリターン期間は、それぞれ85年および56年となる。

c) 閾値超過資料(POT)を用いた確率評価

上に述べた2日降水量が約90mm以下の資料の影響を見るため、図-11右下に示す標本平均超過関数をプロットすると、適当と考えられる閾値109mmが得られる。図-11左図はPOTのプロットとそれに指数分布(Exp)と一般化パレート分布(GP)をフィットさせた分布曲線を図-10に上書きした

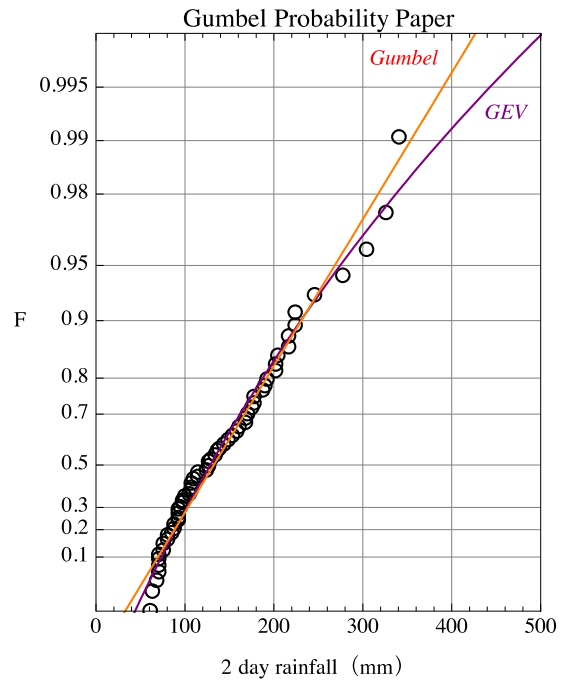


図-10 日吉ダム年最大2日降水量の確率プロット

ものである。この際、POTの資料と分布曲線それぞれを、

$$F(x) = \exp[-\lambda(1 - G(x))]$$

を用いて変換している。ここに、 $F(x)$  : AMSの非超過確率、 $G(x)$  : POTの非超過確率、 $\lambda$  : POTの1年あたりの生起数である。POTは閾値以上のものしか抽出しないが、一般に閾値の大小により当てはめる確率分布の形状が異なる。この資料の場合、閾値を徐々に下げていくと、閾値以上の中位の部分の資料とは特徴の異なる資料を含むことになり、結果的にExpの直線はより反時計回りに回転する。一方、GPの曲線(図中赤色破線)はGEVと同様、上に凸の曲線となってTailが厚くなる。

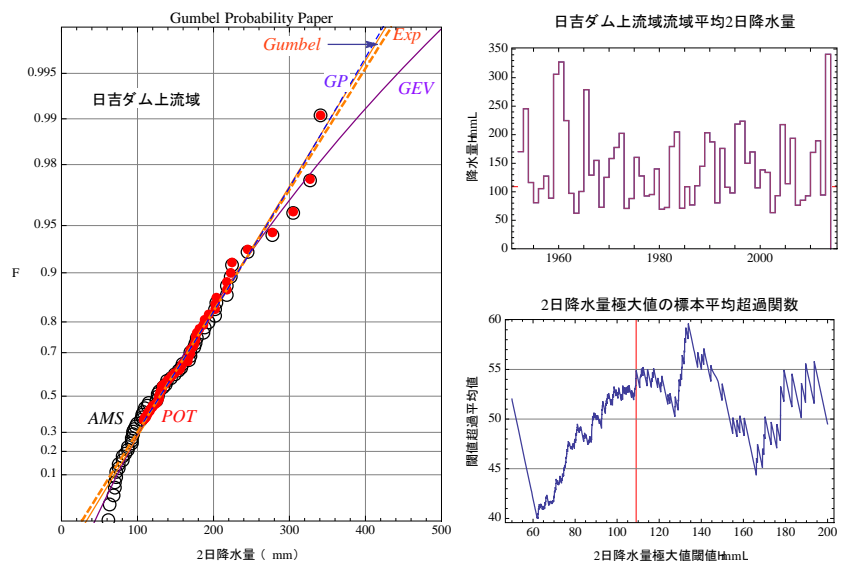


図-11 日吉ダム2日降水量の標本平均超過関数とAMSおよびPOTの確率プロットの比較

閾値の選定にはいくつかの手法が提案されているが、ここでは、標本平均超過関数により判断するとともに確率プロットも判断の参考にした。閾値109mmでのPOTを用いた結果はほぼグンベル分布の結果と同じである。閾値を95mm以下にしていくと徐々にGPがExpやグンベル分布から離れ、GEVに近づいていく。このように閾値を下げることは、洪水とは呼べないような出水の降水イベントを含めて判断することを意味する。実際、日吉ダムは1998年に管理開始しているが、洪水調節操作はほぼ総雨量95mm以上で行っている。水文頻度解析において、その小規模イベントの含有の有無が外挿する部分の確率水文量に大きく影響することがあるので、注意を要する。ここではAMSだけでなくPOTも併せて利用できたのでこのようなことが確認できたが、一般にAMSだけではこのようなことは判断できないので、POTによる解析も可能なように資料の蓄積が望まれる。

日吉ダムは管理開始以降必ずしも毎年洪水調節操作を行っているわけではない。一定の基準を満たした時に洪水調節操作を行っており、洪水調節記録はPOTと考えることができる。この記録から、ダム流域24時間雨量と流入ピーク流量について2012年までのサイズ21の資料と2013年9月末までのサイズ22の資料を用いた確率プロットをそれぞれ図-12および図-13に示す。24時間雨量および流入ピーク流量とも2012年までの最大値のほぼ2倍の値が台風18号でもたらされている。また、GPによる評価は2012年までは上限を持つのにに対し、2013年のデータが加わるとTailの厚い分布となっており、一点のデータの追加で分布形が変わることから、説得力のある確率評価を行うのが難しい。

## (2) 淀川流域の基準地点および主要地点

次に淀川の基準地点および主要地点の資料を見る。

図-14は主要地点等の上流域面積を考慮した降雨継続時間降水量の年最大値の経年変化である。各地点の時系列資料についてMann-Kendall検定を行った結果、すべての地点で有意ではないが減少傾向がみられる。日吉ダムの場合は1976年以降、上昇傾向がみられたが、こちらにはみられない。台風18号時の雨は広域的に長時間降り続き、淀川流域でのすべての主要地点、基準地点で既往最大と同程度またはそれを超える雨量を記録しており、上述したDD解析の結果と同様の結果である。図-15はこれらの値の確率評価である。この図から、2013年台風18号時の値は請田および羽東師ではほぼ1/100、枚方および宇治では1/200より低頻度の現象であったと考えられる。

図-16は羽東師地点におけるピーク流量の年最大値時系列、標本平均超過関数およびAMSとPOTによる確率評価である。標本平均超過関数による閾値の選定はAMSの確率プロットの屈曲地点とよく対応しており、適切に選ばれていることがわかる。POTにGPをあてはめると

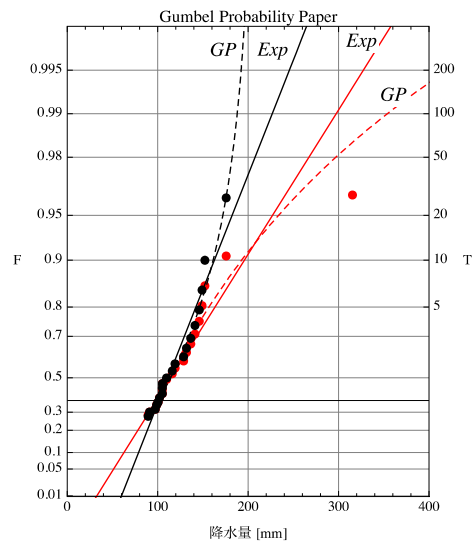


図-12 日吉ダム流域24時間雨量  
(黒：2012まで、赤：2013まで)

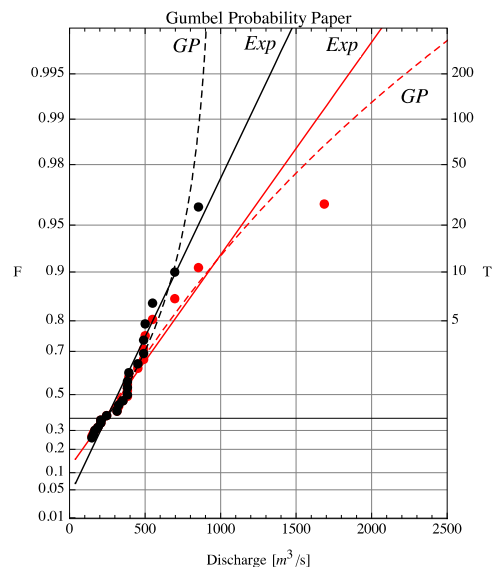


図-13 日吉ダム流入ピーク流量  
(黒：2012まで、赤：2013まで)

上限を持つ分布になり、AMSにあてはめたGEVと対照的である。Expで判断すると、2013年のイベントは1/100よりわずかに低頻度のイベントと判断される。

図-17は基準地点枚方におけるピーク流量の年最大値時系列、標本平均超過関数およびAMSPOTによる確率評価である。標本平均超過関数によると4,400m³/sと3,100m³/sの2つの候補が考えられるが、標本サイズを確保することも考えてここでは後者を選定している。POTの中位の部分のプロットが羽東師と枚方で類似しているが、既往最大と2位の値がGPの形状母数の正負を決めているように見える。閾値の選定は確率プロットのAMSの屈曲地点とよく対応しており、適切に選ばれていることがわかる。また、2013年のイベントはExpおよびGPともに1/100より高頻度のイベントとして判断される。

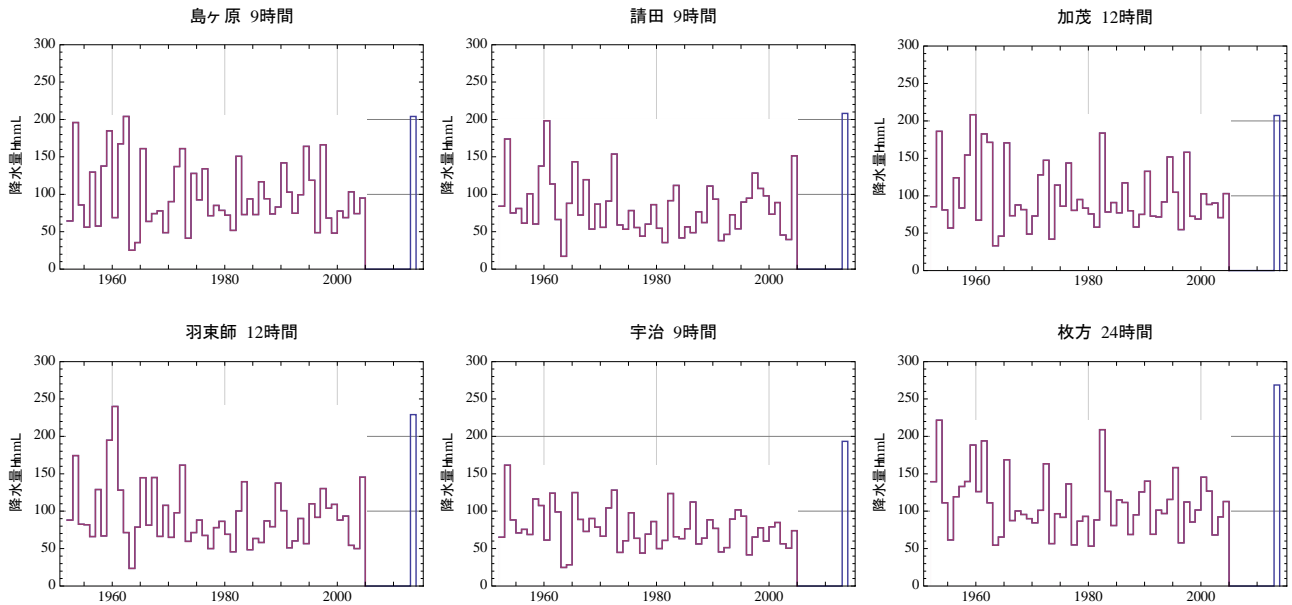


図-14 淀川流域主要地点流域平均降水量の年最大n時間降水量の経年変化  
統計的に有意ではないが若干減少傾向にある

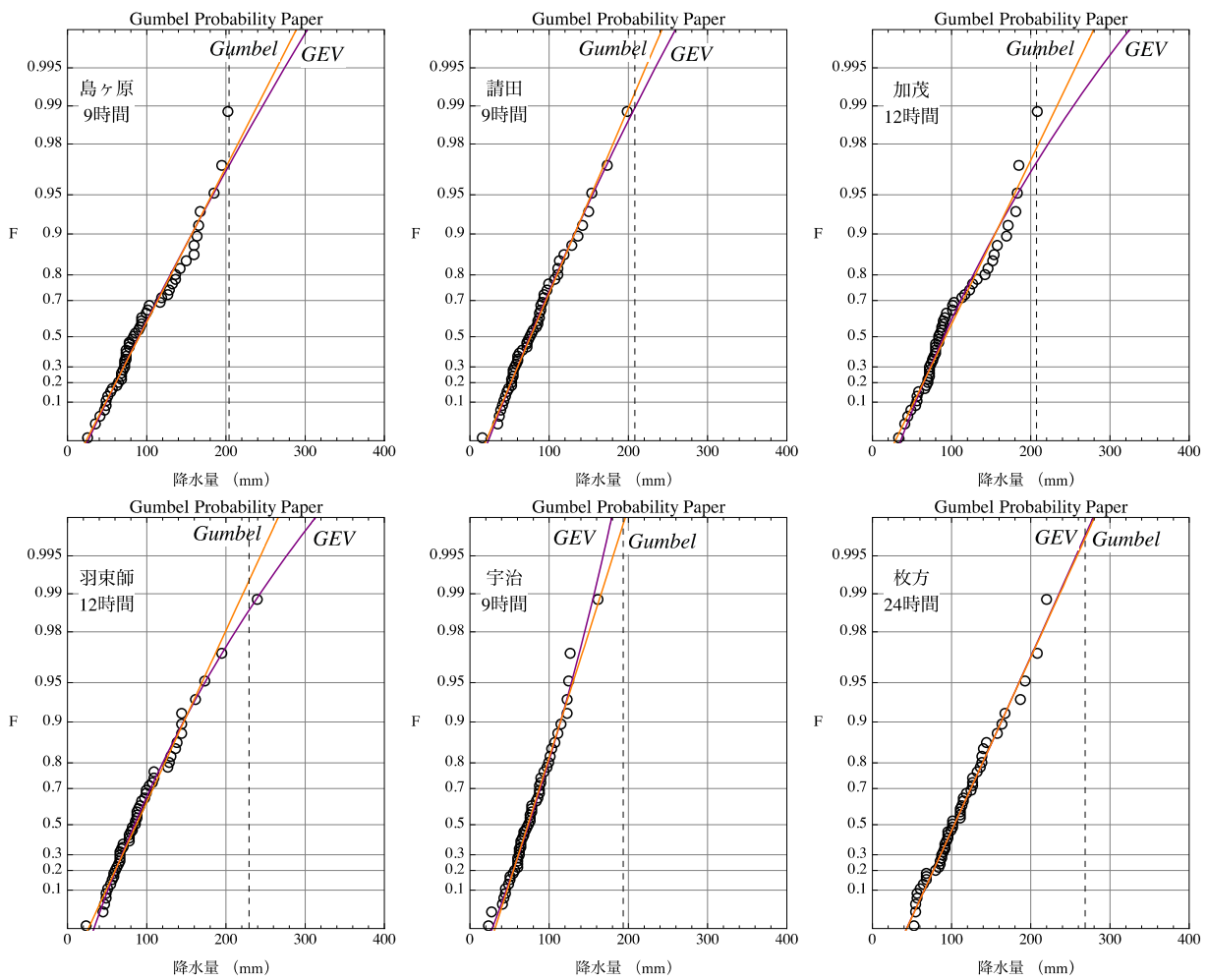


図-15 1952年から2004年までの資料による主要地点等のn時間降水量の確率評価  
紫色の縦線は2013年台風18号時の暫定値を示す

ここに示さなかった島ヶ原, 請田, 加茂, 宇治についてもピーク流量の確率プロットは上に凸の屈曲を示しTailのあつい分布形状となっている. このため, 外挿区間のクォンタイル推定においてAMSのGumbelは小さめ, GEVは大きめとなる. GPについては資料中の最大値と2

位の値の関係やPOTのサンプルサイズによっては極端に小さな上限を有する分布関数となることがあり, 注意を要する. Expが最も説得性を有しており, 閾値を多少変えてもロバストである.

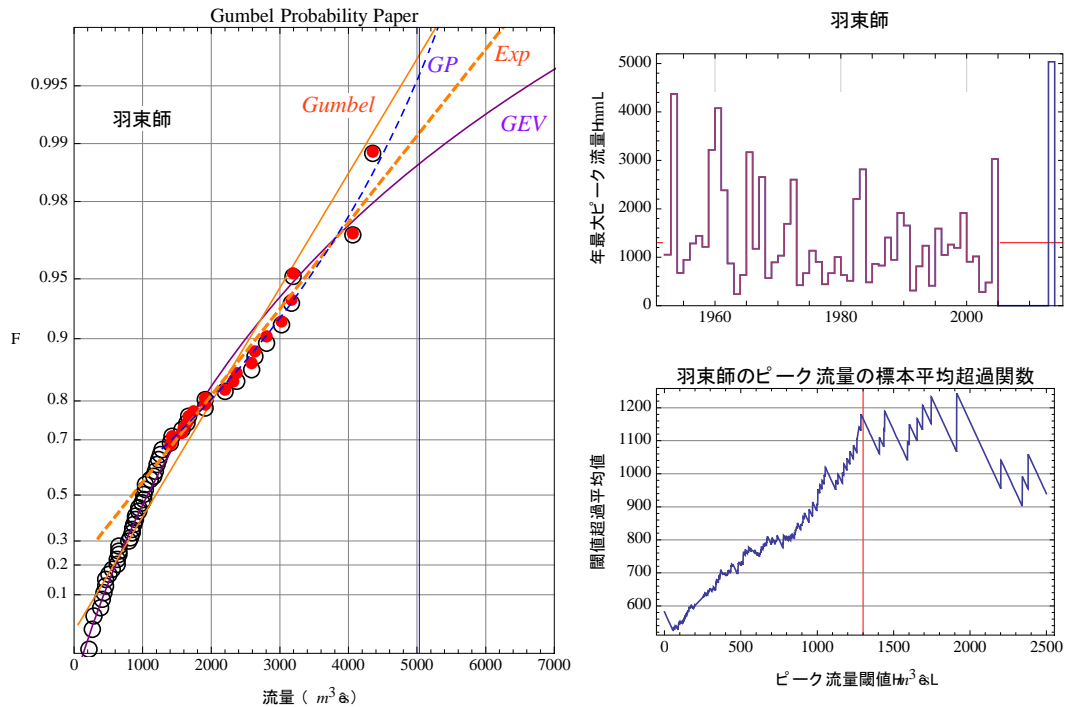


図-16 ピーク流量の年最大値時系列, 標本平均超過関数およびAMSとPOTによる確率評価 (羽束師地点)

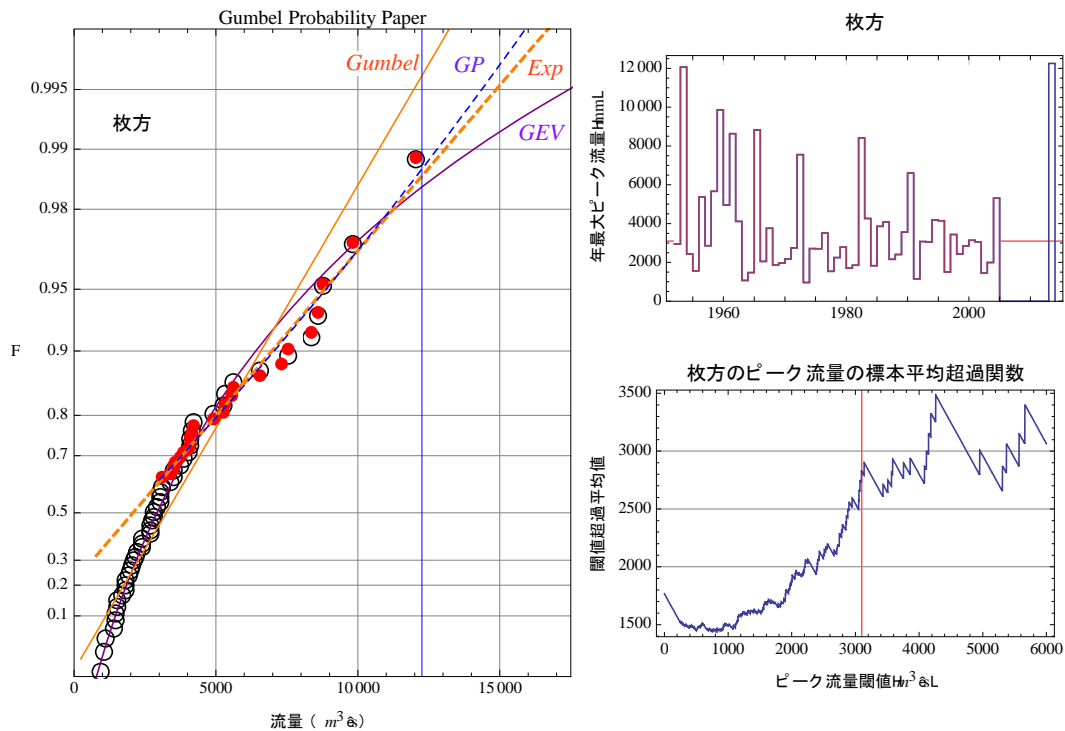


図-17 ピーク流量の年最大値時系列, 標本平均超過関数およびAMSとPOTによる確率評価 (枚方地点)



図-18 調査対象地点



写真-2 桂川左岸上流側から見た渡月橋。橋桁の高さにまで流木が達している。



写真-1 京都市伏見区下鳥羽付近での鴨川左岸堤防上の浸水高



写真-3 桂川右岸（渡月亭付近）での浸水高

#### 4. 現地の被害状況

##### (1) 調査日および調査対象地点

調査は2013年9月18日（水）に実施した。調査対象地点を図-18に示す。鴨川流域の京都市伏見区下鳥羽、桂川流域の京都市右京区嵯峨天龍寺（渡月橋）、亀岡市（請田、市街地）の被害状況と日吉ダムおよび世木ダムにおける流木の滞留状況について調査した。

##### (2) 京都市伏見区下鳥羽（鴨川）

京都市伏見区下鳥羽での鴨川左岸の堤防上での痕跡高を写真-1に示す。堤防天端から0.39mの浸水高が確認された。堤防上には、当日の水防活動によって積み上げられた土嚢が残っており、土嚢の高さは堤防天端から0.4mほどであった。周辺住民への聞き取りをしたところ、この地点では9月16日5:30から9:30にかけて鴨川が越水し、7:00～7:30が水位のピークであったとのことである。

##### (3) 京都市右京区嵯峨天龍寺（渡月橋）

桂川左岸の上流側から見た京都市右京区嵯峨天龍寺の



写真-4 桂川と鴨ノ川の合流点付近（保津峡上流側）

渡月橋の様子を写真-2に示す。橋桁の高さ付近まで流木が達している様子がわかる。渡月橋周辺の中之島や右岸では、腰の高さ（0.9m）程度の浸水高となっているところがあった（写真-3）。

##### (4) 亀岡市（請田、市街）

亀岡市請田周辺の桂川と鴨ノ川の合流地点の様子を写真-4に示す。合流地点では桂川の右岸堤防が霞堤となっているとともに、下流が保津峡の狭窄部となっていることから、遊水地として機能が期待される地域となってい



る。合流点付近では高水敷より約2.3mの浸水深となっていた。

亀岡市街地（イオン亀岡店付近）の様子を写真-5に示す。亀岡市街地では約1mの浸水深となっていたことがわかる。

#### (5) 日吉ダム、世木ダム

桂川の上流域にある日吉ダムと世木ダムの様子を写真-6、写真-7にそれぞれ示す。世木ダムは日吉ダムの上流に位置し、関西電力が管理する発電用の重力式コンクリートダムであるが、日吉ダム湖（天若湖）が満水時にはほとんどが水没する。世木ダム直下には大量の流木が滞留している様子が見られる。

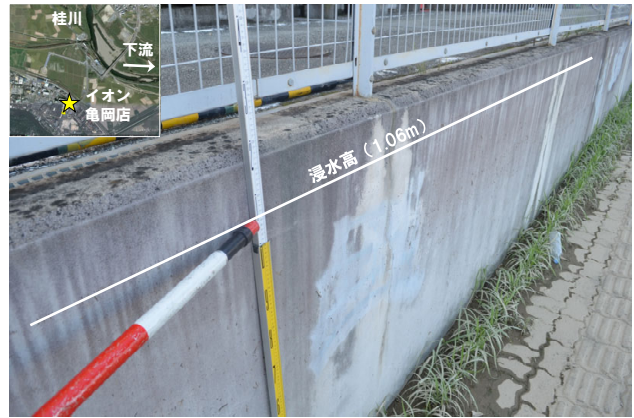


写真-5 亀岡市街（イオン亀岡店前）での浸水深

### 5. 日吉ダムの洪水調節操作と効果について

#### (1) 概要

台風18号災害では、桂川上流の日吉ダム（独水資源機構1997年完成）や由良川上流の大野ダム（京都府1961年完成）が大きな洪水流入量を記録し、洪水調節操作により下流の氾濫災害を大きく軽減させた。このうち日吉ダムは、堤高67.4m、総貯水容量6,600万 $m^3$ （うち、洪水調節容量4,200万 $m^3$ ）の多目的ダムであり、流域面積290 $km^2$ に対する洪水調節容量は145mm相当である（1/100の計画雨量は2日雨量で350mm）。

日吉ダムは図-19のように最大流入量1,694 $m^3/s$ （9/16、7時）に対して最大約1,500 $m^3/s$ のカットを行い、亀岡盆地、嵐山および桂川下流域に対して洪水水位の低下に大きく貢献した<sup>8)</sup>。

このカット量を戻すと、例えば亀岡（保津橋）地点は図-20に示すように洪水水位を約1.5m低下させたと推定されている。この洪水カット量が下流に流下していったとすれば、嵐山（天龍寺）の流量を大きく増加させ、渡月橋を大きく越流して最悪の場合は渡月橋に大きな損傷が生じたり、さらに避難指示が出された下流の桂川右岸（羽束師地点）では堤防の越流量が増大し、大規模な破堤氾濫による甚大な被害が生じたりしていたことが懸念される。上記のことから、今回の日吉ダムの洪水調節操作は、全国的にも極めて顕著なダムの効果を示す事例と考えられる。

#### (2) ダム操作の検証

日吉ダムの当初計画では、1/100波形に対応する形で一定率・一定量放流（計画最大放流量500 $m^3/s$ ）の洪水調節操作が設定されている。しかしながら、亀岡を中心に河道の流下能力が十分確保されていないことから、中小洪水においても洪水調節効果が発揮されるように、150 $m^3/s$ の一定量放流による現行操作が規定されている。その結果、概ね1/20程度の洪水規模までは治水効果がより優位となるが、これを超える規模の洪水時には治水容



写真-6 日吉ダム



写真-7 世木ダム直下に滞留した流木

量を使い切ってしまうことが懸念される。

今回の洪水では、図-19に示すように、実際にダムの洪水調節容量を使い切り、洪水時最高水位（サーチャージ水位）に近づくことが予想された。具体的には、今後の降雨・流出量予測とダムの残容量の関係から、9/16、5時前には、同9～10時頃に異常洪水時防災操作（ただし書き操作）の開始水位（El.200.2m）に到達することが予想されたため、9/16、6時にダムに関する重要情報（計画規模を超える洪水時の操作を行う可能性の予告）を発出している。その後、同10時32分に実際に開始水位（El.200.2m）に到達したが、下流水位が高いことから、

被害軽減のために放流量を増加させずに貯留を継続した。さらに、実際に洪水時最高水位（サーチャージ水位）に到達した同11時25分に至っても、非常に高度な判断であったが、下流状況が引き続き氾濫の危険がある極めて厳しい状況であったことと、この時点では降雨が収束しており今後の流入量の低下が見込まれたことから引き続き貯留を継続した。最終的には、同12時1分に、流入量がピークを過ぎ、また、ダム下流の保津橋地点の水位が低下したことから、下流の状況を確認しながら放流量を増加（異常洪水時防災操作に移行）している。この際の最大放流量は500m<sup>3</sup>/sであり、その時点では下流水位はすでに低下してきており、被害の拡大はなかったと考えられる。

これらの関係を、日吉ダムを起点に亀岡～嵐山～桂川下流、さらには、これに順次合流してくる鴨川宇治川、木津川、さらには、3川合流後の淀川本川の洪水ハイドログラフ（観測水位）を時間軸を合わせてプロットしたものが図-22である。これを見ると、以下のような重要な点を確認することができる。

- ・ 今回の洪水は、鴨川を含めた桂川、宇治川、木津川の3川でほぼ同時刻の洪水ピークをもたらしている
- ・ 3川の中では木津川の洪水流出がやや早い傾向にある（木津川では上流の高山ダムで4時以降最大1,100m<sup>3</sup>/sの洪水カットを行っており、この効果を考慮する必要がある）
- ・ 9/16の桂川の各地点がピークを迎えた時刻（亀岡（7時）、嵐山（9時）、桂川下流（9時））には日吉ダムは最大約1500m<sup>3</sup>/sカットの洪水軽減を実施中であり、これが下流水位の低下に大きく貢献した
- ・ 日吉ダムの異常洪水時防災操作（ただし書き操作）への移行に伴い、桂川の各地点でわずかばかりの水位変化が認められるがいずれも水位低下速度がやや遅くなった程度で大きな水位上昇は認められず、また、桂川下流（羽束師）ではほとんどその影響はない
- ・ 桂川下流（羽束師）は9/16の4時から14時過ぎまで計画高水位（HWL7.86m）を上回る高水位が長時間継続した。
- ・ 堤防から越流した鴨川左岸地区の住民から洪水が2回来たとの証言が寄せられたが、場合により、3川合流によってもたらされた影響による水位上昇（6-8時ご

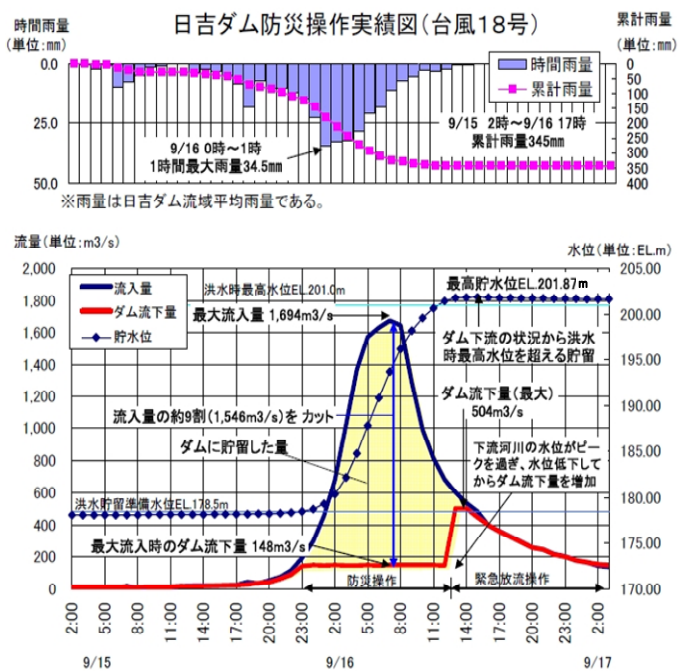


図-19 日吉ダム洪水調節操作（独）水資源機構

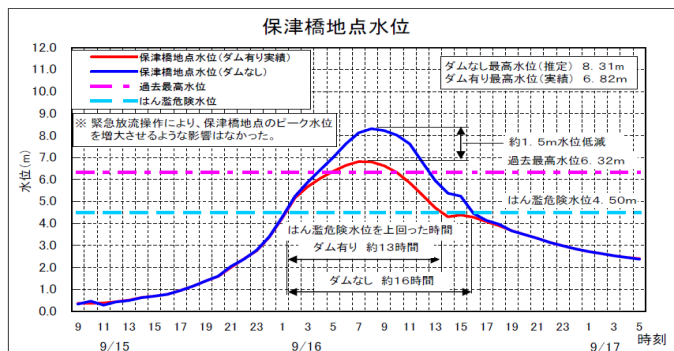


図-20 日吉ダムの洪水調節効果（独）水資源機構

### 日吉ダムの洪水対応履歴

<p>9/15 21:51 “京都・亀岡：大雨警報、洪水警報、南丹・京丹波：大雨警報、洪水注意報”</p> <p>22:34 流入量が洪水量(150m<sup>3</sup>/s)に達し、洪水調節を開始</p> <p>9/16 1:20 保津橋水位がはん濫危険水位4.5m超過</p> <p>1:50 天龍寺地点(渡月橋下流)水位がはん濫注意水位1.8m超過</p> <p>4:57 ※16日9～10時に、ただし書き操作(異常洪水時防災操作)開始水位に達すると予測</p> <p>5:05 京都府に大雨特別警報発令</p> <p>6:00 ダム操作に関する重要情報(計画規模を超える洪水時の操作に関する事前情報) ※ただし書き操作開始3時間前の情報提供を行う。</p> <p>6:44 流入量が最大(1,694m<sup>3</sup>/s)に到達</p> <p>7:40 保津橋地点最高水位6.82m、最大流量3,102m<sup>3</sup>/s (H16T23最高水位超過)</p> <p>9:00 ただし書き操作の承認</p> <p>10:32 通常のただし書き操作開始水位EL200.20mに達したが、本則操作を継続</p> <p>11:00 異常洪水時防災操作に関する事前通知&lt;1時間前通知&gt;</p> <p>11:25 洪水時最高水位(サーチャージ水位)EL201.00mに達したが、本則操作を継続</p> <p>12:01 ただし書き操作開始 ※常用洪水吐ききり500m<sup>3</sup>/s(最大)で待機</p>	
--	--

図-21 日吉ダムの洪水調節経緯（独）水資源機構

ろ)と、桂川自身や鴨川からの流量増による水位上昇(9-12時ごろ)の両者が時間遅れを伴って発生した可能性も否定できない

- 日吉ダムの放流通知が実際の放流開始よりも6時間も早い6時頃に出されているが、この情報に接した下流住民が、2回目の水位上昇をダム放流の影響であると誤解した可能性があり、今後、放流通知の出し方(タイミングとダムから当該地点までの流下時間に関する説明)を再検討する必要がある

### (3) 日吉ダムの効果

図-20あるいは図-22で明らかなように、日吉ダムの効果は極めて大きいと考えられる。これを、亀岡、嵐山、桂川下流の3地区に分けて整理すると以下のとおりである

#### a) 亀岡

従来より浸水常習地域であり、河道整備とともに保津峡の開削が要望されてきた地域である。今回の日吉ダムの洪水調節により浸水深が1m以上軽減されたことで、浸水が生じたエリアにおいてもその影響度が大きく異なったことが想定される。特に、ホームまで浸水した亀岡駅(写真-8)やその周辺地区では、さらに水位が上昇することで、家屋においては床上浸水の増加、鉄道や商業施設では電気系統の障害などが大きく発生し、復旧に長時間を要していた可能性がある。

#### b) 嵐山

嵐山地点では、現在、「桂川嵐山地区河川整備検討委員会」が組織され、治水目的の河道改修(河床掘削、河道拡幅、堤防嵩上げに加えて、固定堰の改築や撤去)と、景観の両立を図るべく検討が進められてきていた。今回の洪水はこうした議論に大きな影響をもたらすと考えられる。国土交通省から発表されているように、今回の日吉ダムの洪水軽減効果により約0.5mの水位低下があったものと推定されている。今回の洪水では、渡月橋の桁下にまで水位上昇しているのが確認されており、ダムが無ければ河川水位が上昇して桁に水面が当たることで急激に上流水位が上昇し、渡月橋上流の左右岸から大きく越流し、今回は被害が限定的であった嵐山の中心地区である左岸側にも大きな影響が出ていたことが想定される。

また、写真-7に示したように、日吉ダムには例年の処理量の約40倍に相当する約13,500m<sup>3</sup>もの大量の流木が捕

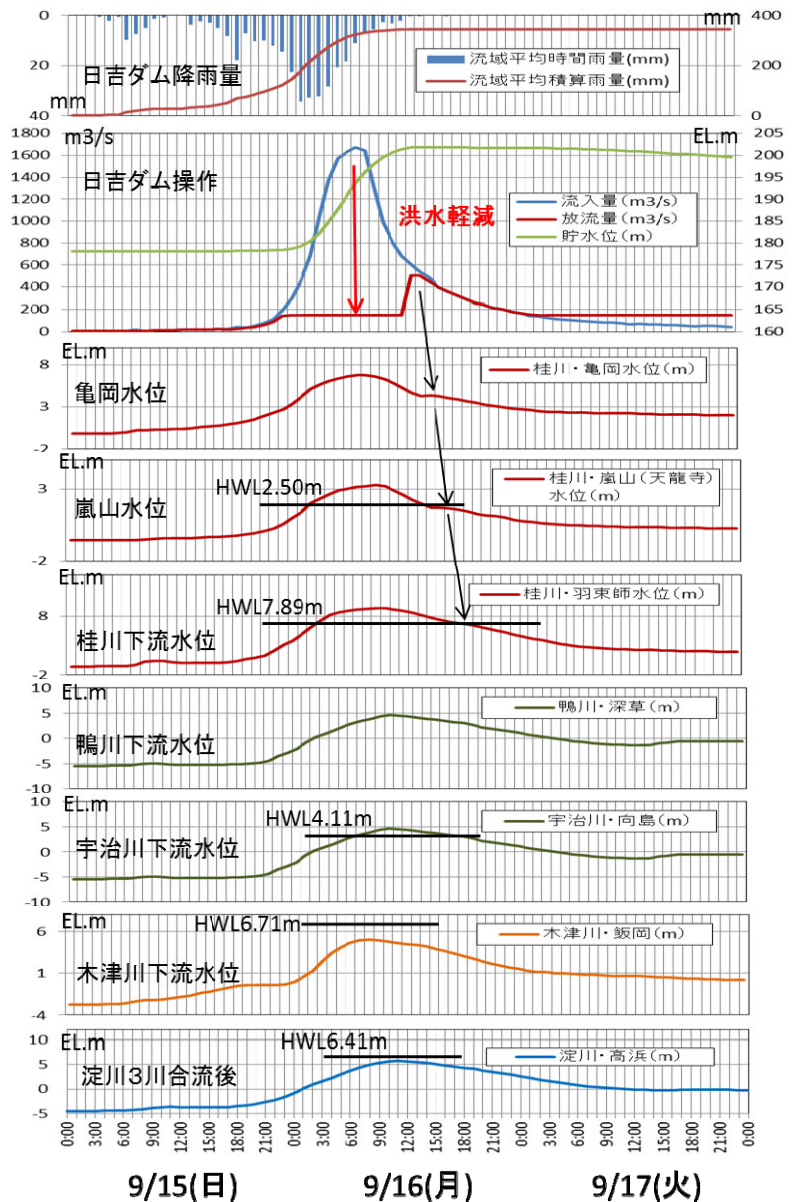


図-22 日吉ダムの洪水調節と下流水位の関係



写真-8 ホーム下まで浸水した亀岡駅(堀智晴教授提供)

捉されたことが報告されている。日吉ダム下流には、亀岡までの区間に、複数の道路橋やJR山陰線の鉄道橋梁が存在し、さらに下流には、嵐山のシンボルである渡月橋



写真-9 洪水前後の日吉ダム貯水池内（世木ダム下流）の流木集積状況（独）水資源機構提供

があり、仮にこれら大量の流木が洪水とともに下流に流れ、これらの橋梁に集積することで、洪水位のさらなる上昇をもたらすとともに、最悪の場合にはこれら橋梁が大きく損傷していた可能性も否定できない。

c) 桂川下流

桂川下流では、計画高水位を10時間も上回る高水位が長時間発生し、特に桂川右岸（羽東師地点）では9/16、9時30分ごろには400m区間で堤防から越水が生じ、重点的な水防活動が行われるとともに、広範囲に避難指示が出された。この地区で破堤氾濫が生じると1,300戸近い床上・床下浸水と約1.2兆円の経済損失が生じる可能性があったと報告されている。日吉ダムがなければ、堤防からの越流量が増大し、大規模な破堤氾濫による甚大な被害が生じていた可能性も否定できない。この区間では、これまで引堤と掘削による河川改修が行われてきていたが、これらの効果に加えて日吉ダムの洪水調節効果によって危機的な状況が回避されたと考えられる。

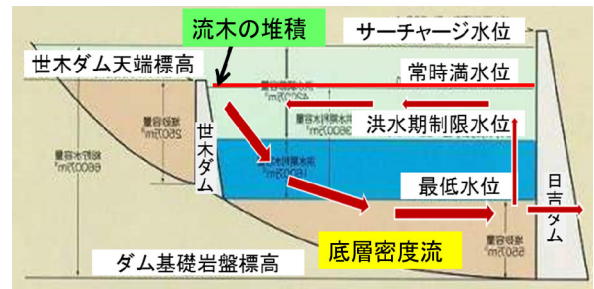


図-23 日吉ダム貯水池内の流動と流木の堆積の関係

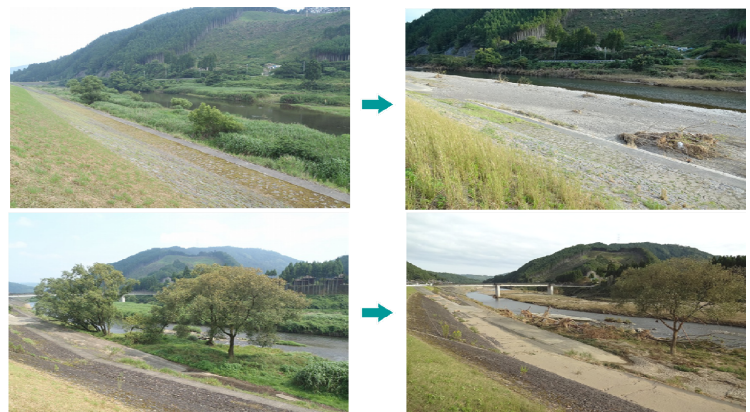


写真-10 ダム上流河道内の出水前後の樹木の倒伏・流出状況（独）水資源機構提供

(4) 流木について

前述のように、今回の洪水では大量の流木が日吉ダムに流れ込み捕捉され、下流のさらなる洪水災害を未然に防止したと考えられる。

特に、これらの流木は日吉ダムの特徴であるダム湖の中に残された関西電力㈱の世木ダムの直下に集積しており、これを洪水前後で比較したものを写真-9に示す。これらの流木が世木ダム下流に集積した理由として、日吉ダム貯水池内に図-23に示すような流れが発生していたことが推測される。この流れの起動力は、世木ダムを越えて日吉ダム貯水池の中～下層に流れ込んだ洪水時の高濁度流（高密度流）であり、その補償流として貯水池表層に上流向きの流れが形成され、その流れが世木ダムからの越流水と合流して潜り込む領域（潜り点）に流木が長期間捕捉されたものと考えられる<sup>9)</sup>。

次に、これらの流木がどこから来たかを考える。日吉ダム管理所では洪水前からダム上流河道の定点写真を記録しており、この分析によれば、写真-10に示すように、河道内や河岸沿いの樹林化していた樹木の一部が久しぶ

りの洪水で倒伏して下流のダム湖に流入したことが推測される。このような記録は極めて貴重であり、今後のダム管理において、上流河道の定期的な記録の重要性を示唆している。

最後に、洪水氾濫の拡大の観点から見た、日吉ダムによる流木災害の防止について整理する。このような流木によって洪水被害が拡大する事例は、平成16年の福井豪雨などでも顕著であり、上流ダム群が流木を捕捉することによる効果（副次的効果）は、この福井豪雨時の九頭竜川水系真名川ダムや東海（恵南）豪雨時の矢作ダムなどでも指摘されている<sup>10)</sup>。一方、今回も日吉ダム上流の河道で見られたように、久しぶりの大きな洪水がダム下流の河道を流下することに伴う河道内や河岸沿いからの新たな流木の発生が懸念される。日吉ダムの調節がなければ、ピーク時には最大1,700m<sup>3</sup>/sもの洪水流量がダム下流の河道を流下していた可能性があり、この流量によ

て、下流河道からも新たな流木が発生していたことが懸念される。

これら一連の流木災害に伴う洪水氾濫の拡大防止効果を図示したものが図-24であり、ダムには「①ダム湖による流木の捕捉・流下軽減（直接的効果）、②洪水ピークカットに伴う下流河道からの追加的な流木発生防止（間接的効果）」の両面の効果があるものと考えられる。今後、ダムの役割と効果について、流木災害と洪水氾濫の関係からも検証が必要と考えられる。

謝辞：淀川水系の資料は国土交通省近畿地方整備局から提供頂いた。日吉ダムに関連する資料は独立行政法人水資源機構から提供頂いた。また、亀岡の浸水状況の写真は京都大学防災研究所堀智晴教授から提供頂いた。快く貴重な資料を提供・解説頂いた関係者の皆様方にここに記して謝意を表す。

### 参考文献

- 1) 国土交通省気象庁：台風第18号による大雨，2013.
- 2) 総務省消防庁：台風第18号による被害状況等について（第11報），2013.
- 3) 国土交通省気象庁：日本近海日別海面水温，気象庁ホームページ[http://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/db/kaikyoo/daily/sst\\_jp.html](http://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/db/kaikyoo/daily/sst_jp.html)（2014.6.4参照）.
- 4) 国土交通省気象庁気象研究所：平成25年台風第18号の発達とそれに伴う近畿地方の大雨の発生要因，2013.
- 5) 国土交通省気象庁大阪管区气象台：平成25年台風18号による大雨と暴風について（第2報），2013.



図-24 日吉ダムにおける流木災害に伴う洪水氾濫の防止効果

- 6) (独) 水資源機構：  
<http://www.water.go.jp/kansai/kansai/html/kisyahappyou/pdf/130918kisyahaltupyou.pdf>
- 7) Reiss, R.-D. and M. Thomas: Statistical Analysis of Extreme Values, Birkhäuser, p.316, 1997.
- 8) 国土交通省近畿地方整備局河川部，平成25年9月台風18号洪水の概要，2014.3.  
<http://www.kkr.mlit.go.jp/river/saigai/20130916tyhoon18/saigaihoukoku04.pdf>
- 9) 貯水池土砂管理ハンドブック, Gregory L. Morris・Jiahua Fan著／角 哲也・岡野真久監修：技報堂，2010.
- 10) 角哲也，谷崎 保，2004年福井豪雨における九頭竜川上流ダム群の洪水調節効果，大ダム，198, 2007.

# 台風18号による亀岡市中心部の浸水状況

## FLOODING IN CENTRAL KAMEOKA CITY CAUSED BY HEAVY RAINFALL OF TYPHOON No. 18.

堀 智晴<sup>1</sup>  
Tomoharu Hori

<sup>1</sup>正会員 博（工） 京都大学教授 防災研究所（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄）

### 1. 調査地域の概要

国土交通省水文水質データベースの速報値によると、桂川亀岡水位観測所で9月16日午前7時にピーク水位6.81mを記録している。この時刻付近の亀岡市内の浸水状況を調査した概要を報告する。図-1は、JR亀岡駅を中心とした調査地点をGoogleMap®上に記入したものである。地図中央付近を走るJR嵯峨野線（山陰線）から北側に離れた位置に桂川（保津川）が流れている。桂川とJR嵯峨野線との間は、盛土された道路部分を除きJRの線路よりもさらに3メートル程度低い水田が広がっている。

### 2. 2013年9月16日午前7時過ぎの浸水状況

写真-1, 2 はJR亀岡駅の浸水状況である。線路部分は完全に水没し、氾濫水がホーム上面に迫っていることがわかる。また、写真-2を見ると、奥から手前に向かって（西側から東向けて、桂川上流方向から下流に向けて）氾濫水の流れがある様子がうかがえる。

写真-3, 4は亀岡駅の北側（桂川側）に立って、それぞれ上流側と下流側を見た様子である。写真-4の奥の方に橋梁（保津大橋）が見えるが、黒く見えるその大部



図-1 亀岡市内の浸水状況調査地点（GoogleMap®上に調査地点を記入）



写真-1 JR亀岡駅プラットホームを南側から望む

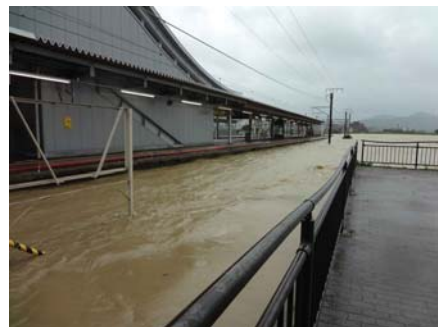


写真-2 JR亀岡駅北口（桂川側）より西（上流側）を望む

分はJR線路とその北側の水田部分をまたいで現在建設中の部分であり、その下は河川ではない。写真中央より左寄りに白っぽい斜張橋の塔が見えるが、その部分が桂川をまたぐ部分である。

写真-5から7はクニッテルフェルト通りの北古瀬交差点付近（図-1の②）で、交差点部分が周囲より低くなっているために浸水している。写真-7からこの付近で雨水排水管から水があふれ出していることがわかる。なお、この近くを流れる小河川が氾濫している様子が写真-8である、地点②の氾濫は雨水排水管からの溢水と

地点③付近の河川からの溢水の両者によるものと考えられる、

写真-9は、JR亀岡駅西方のふれあい通り（図-1の地点④）からJR嵯峨野線方向（北東方向）を望んだものである。ふれあい通りとJRの線路（盛土）との間にも路面の高い部分から3m程度低い水田が広がっており、その部分が冠水している。写真-10はふれあい通りを地点④から北西方向に進んだ地点であり、地点④より標高が低くなっている部分の浸水状況である。



写真-3 写真2から視点を北側に寄せたもの



写真-4 JR亀岡駅北口（桂川側）より東（下流側）を望む



写真-5 クニッテルクニッテルフェルト通り北古世付近の浸水（地図②）



写真-6 写真-5の浸水エリアの中央部分



写真-7 写真-5の浸水エリア（下水道から氾濫している様子）



写真-8 亀岡資料館前（右側の木より右側が河道（地図③））



写真-9 ふれあい通りから北東（桂川方向）を望む（地図④）

# 平成 25 年台風 18 号による水害が京都府産 アユモドキ個体群に及ぼした影響

岩田明久<sup>1</sup>

<sup>1</sup>特別団員 水産学博 京都大学教授 大学院アジア・アフリカ地域研究研究科

(〒606-8501 京都市左京区吉田本町総合研究二号館)

キーワード: 台風 18 号, アユモドキ, 亀岡市, 個体群

## 1. はじめに

アユモドキ *Parabotia curtus* は日本特産の淡水魚で、コイ目アユモドキ科に属する。その分布は特異であり、本来より高梁川・旭川・吉井川・足守川などの岡山県の河川、広島県芦田川と琵琶湖・淀川水系の琵琶湖・宇治川・木津川・桂川・鴨川・清滝川・淀川のみに限られている。日本の淡水魚相成立を解明するうえでも学術的にも極めて重要な種類であるが絶滅が危惧され、1967年にIUCNからThreatened species(DD)、1977年に文化庁から種指定の天然記念物、水産庁に1998年から絶滅危惧種、2002年に京都府からは絶滅寸前種、環境省から2003年にCR(絶滅危惧IA類)、2004年には種の保存法に基づく「国内希少野生動植物種」、さらには京都府から2008年に京都府絶滅のおそれのある野生生物の保全に関する条例の指定希少野生生物の指定を受けているが、現在、岡山県旭川・吉井川水系と京都府亀岡市以外の地点は絶滅の状態にある<sup>1), 2), 3), 4), 5), 6)</sup>。

岡山県旭川および吉井川の生息場所では市民・行政による保全活動が行われ個体群の現存が保たれている。淀川水系に関しては、1992年、京都府八木町と亀岡市にあるアユモドキの生息地が京都府の自然200選に選定された。その後、八木町の主生息地は1987年末から1988年初めにかけての冬季に水が枯渇し成魚の越冬場所が干出して以来、その生存が確認できていないが<sup>4), 7)</sup>、天然で絶滅したと思われる八木町の個体群は琵琶湖博物館と大阪府水生生物センター等で系統保護されている。この点で亀岡市は琵琶湖・淀川水系において天然個体群が持続的に生存している唯一の生息地である。しかし、2003年に至るまでこの地域に生息する個体群の保全活動に資する調査はなされてこなかった。そこで2003年9月より文

化庁、2004年からは環境省の調査許可、さらに2008年は京都府の調査許可をうけて、著者は地元市民・行政や他の方々とともに調査を行い、毎年9月には、当該生息地における推定個体数を、標識再捕獲法に基づいて算出してきた。この調査期間にあって、平成25年の台風18号によってもたらされた水害は、上記の調査期間中、最大の規模であった。

本稿は、2012年と2013年の推定個体数を比較することにより、この水害が京都府亀岡市に生息するアユモドキ個体群に及ぼした影響について推測することを目的とする。

## 2. 水害時におけるアユモドキ生息場所の状況およびその後の変化

### 2- (1) . アユモドキ生息場所の概要

亀岡市においてアユモドキが最も多く生息している場所は、桂川の一支出であるが、上記のように天延記念物等に指定されている希少種のため、生息場所の特定等、本種の生息情報が確定されぬよう、その詳細を記述することは避けることにしたい。

### 2- (2) . 9月16日および一週間後におけるアユモドキ生息場所の状況

平常時における本種の生息場所の水深は30~50cm前後であるが、9月16日午前9時30分ころには、水深が約3m以上に達し、水面が近傍にある橋の欄干中央部に達しており、大量の流木等が欄干上部に引っかかっている状態で、表面流速は目視でおおよそ1m/秒だった。水害一週間



後には、この場所の水深はほぼ正常にもどっていた。

### 3. 水害後におけるアユモドキ推定個体数調査

2013年における標識再捕獲調査は、当初、9月16日に標識付け調査、9月23日に再捕獲調査を行う予定であった。しかし、9月16日の水害により、標識付け調査を9月23日、再捕獲調査を9月29日に変更した。

#### 3- (1). 調査方法

上述した生息場所において、アユモドキの生息している可能性のある、転石や障害物の周辺等を、3~5人が手網を用いて全面を囲んだうえで、それを動かし、驚いて出てきた個体を捕獲した。また、塩化ビニール製パイプをトラップとして使用し、その中に潜んでいる個体を捕獲した。標識付け調査と再捕獲調査の調査区間および調査努力量はほぼ前年度と同等であった。

9月23日に標識付け調査で捕獲された個体は臀鰭の一部を切除して、標識を付した。9月29日の再捕獲調査では捕獲された個体について、9月23日に標識付けされたものがいるかどうかを確認した。

個体数推定およびその95%信頼限界は、9月23日に標識付け調査で捕獲され、標識付けされた個体、9月29日の再捕獲調査で捕獲された個体数および、その中における9月23日標識付け個体の数を基に、Pertersen法(Chapmanの修正式)を用いて行われた<sup>8)</sup>。

#### 3- (2). 調査結果

9月23日に標識付け調査で当歳魚(体長80mm以下)が20尾、一歳以上の親魚(体長81mm以上)が34尾捕獲された。これらの全ての個体について、臀鰭先端に標識付けを行った。

9月29日の再捕獲調査で、当歳魚(体長80mm以下)が22尾捕獲され、そのうち2尾に9月23日の標識が認められた。当歳魚の最小個体は体長39.1mmであった。一歳以上の親魚(体長81mm以上)は43尾捕獲され、そのうち2尾に9月23日の標識が認められた。

これらの数値を基に、Pertersen法(Chapmanの修正式)を用いて、個体数推定およびその95%信頼限界を求めたところ、当歳魚(体長80mm以下)は $160 \pm 136.2$ 尾、一歳以上の親魚(体長81mm以上)は $512.3 \pm 464.3$ 尾という結果を得た。

### 4. 論議

先に述べたとおり、本調査区間では、2003年9月より文化庁、2004年からは環境省の調査許可、さらに2008年は京都府の調査許可をうけて、著者は地元市民・行政

や他の方々とともに調査を行い、毎年9月に、当該生息地における推定個体数を、標識再捕獲法に基づいて算出してきた。昨年における推定個体数およびその95%信頼限界は、当歳魚が $24.6 \pm 9.4$ 尾、一歳以上の親魚は $547.6 \pm 335.6$ 尾という結果を得た。

当歳魚における昨年の95%有意の最大値と、今年の当歳魚95%有意の最小値はわずかに重複するものの、両年における中央値と、今年の95%有意の最大値は本年の方が明らかに多く、今年の当歳魚における推定個体数は有意に多いと思われた。

一方、一歳以上の親魚については互いの95%信頼区間が大きく重複しており、有意な差は認められないと思われた。

本調査域のアユモドキの成魚は、上述した生息場所や桂川本流に生息し、浮き石の下や水衝部にある空石積み石垣護岸等の隙間を好んで利用している。産卵は、6月上旬に行われ、ふ化した仔魚は約1ヶ月程その場所に留まって成長する。その後、稚魚に成長した個体は、生息河川やその周辺に合流する農業用水路に遡上し、その場所を成育場所として利用する。

昨年、当歳魚が少なかった理由としては、2012年7月15日に一日合計127.0mmのゲリラ豪雨があり(亀岡市消防署での計測)<sup>9)</sup>、その後も、7月20日に大雨警報が発令され(降水量56.5mm;同上)、仔魚の生息環境が激流に襲われた。この時期、アユモドキは遊泳力がまだ弱い仔魚の段階のため、これらのことによって仔魚のほとんどが流出してしまった可能性がある。また、昨年は5月末の河川流量が少なく、河床に糸状緑藻類のシオクサ類が異常繁殖し、6月初旬には腐敗しているものも多く観察されるとともに、繁殖場所に強い濁度の水が流入した。これらにより、例年に比べて水質が悪く、繁殖が充分に行われなかった可能性がある。一方、本年における繁殖期前後の状況は昨年と比較すれば好条件であり、ほぼ正常に繁殖が行われたものと思われる。

本年における当歳魚の最小個体は体長39.1mmであり、これは例年とほぼ同様の状況であった。本種の稚魚は9月には体長が40~80mmとなり、遊泳力や危険からの回避行動等は成魚とほぼ同様の能力を持つようになっている。9月16日の水害においても、生存の危険から成魚と同様に待避できたものと推定される。

一歳以上の親魚については昨年と今年で、推定個体数において有意な差は認められないということを先に述べた。本種は、上述したように、繁殖期以外は河川流域に生息し、梅雨のころの水位の上昇によって生じる一時的な水域に侵入して繁殖を行うといった生態を有しており、氾濫原の環境に適応した魚種といえる。氾濫原では、水位の上昇に伴う環境の変化が繰り返し生じる場所であり、本種はそのような事態を回避する行動を有しているものと思われる。今回の水害の後でも、昨年と推定個体数に有意な差が認められなかったことは、このような理

由によるものと考えられる。

結論として、平成25年台風18号による水害は、京都府産アユモドキ個体群の個体数に対しては影響をほとんど及ぼさなかったものと思われる。

ただし、この水害により、アユモドキの餌である水生昆虫をはじめとする水生の小動物群集に関しては大きなダメージを被ったことが予想される。仮に、餌不足により、越冬するまでに十分な栄養が摂取できなかった場合、越冬時の死亡率増加につながる。また、来年度の春に越

冬で消耗した体力を回復し、生殖腺を成熟させるための餌が充分でなければ、繁殖が危ぶまれることになる。

また、先に述べたように、アユモドキの生息環境も変化している。これらのことがどのように影響するのか注意深く検討していく必要がある。

#### 謝辞:

本報告書作成に関する調査、作業等に関係された全ての方々に感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) 水産庁編, 1998. 日本の希少な野生水生生物に関するデータブック. 日本水産資源保護協会, 東京.
- 2) 環境省自然環境局野生生物課編. 2003. 改訂・日本の絶滅のおそれのある野生生物—レッドデータブック—4 汽水・淡水魚類, 自然環境研究センター, 東京.
- 3) 京都府企画環境部環境企画課編. 2002. 京都府レッドデータブック上巻 野生生物編. 京都府企画環境部環境企画課, 京都.
- 4) 京都淡水魚研究グループ. 1988. 天然記念物アユモドキの生息環境創成に関する研究 II. 公益信託 TaKaRa ハーモニストファンド(2): 87-99.
- 5) 中村守純, 元信 堯. 1971. アユモドキの生活史. 資源科学研究所彙報, 75:9-15.
- 6) 京都府, 2008. 京都府絶滅のおそれのある野生生物の保全に関する条例の概要. <http://www.pref.kyoto.jp/kisyousyu/1198225714475.html>.
- 7) 八木ホタル・アユモドキ研究会. 1994. 八木町西田地内用水路におけるアユモドキ生息調査結果報告書. 八木ホタル・アユモドキ研究会: 1-12.
- 8) 伊藤嘉昭・山村則男・嶋田正和. 1992. 動物生態学. 蒼樹書房, 東京.
- 9) 亀岡市気象情報, <http://www.city.kameoka.kyoto.jp/uryou/uryou.htm>

# H25年度 京都水害報告書

岡本隆明, 戸田圭一

## a) 桂川渡月橋(調査日時：9.17 15:00)

桂川渡月橋周辺は、今回の水害によって大きな被害を受けた地域の一つである。洪水流量に対して、河道の規模が小さいことによる流下能力不足が主な要因であることは現地の状況から明らかである。左岸側の河道沿いの道路を流下した痕跡が明瞭に確認された。部分的な片付けは行われていたものの、道路上には土砂が大量に堆積している様子が確認された。左岸側の商店街のシャッターの洪水痕跡から1-2m程度の最大浸水深であったと考えられる(図1)。氾濫時に転倒し先端まで汚れたバス停の案内板がみられた(図2)。流木よけに大量の樹木がひっかかっているのがみられる(図3)。

右岸側の被害も顕著であり、石積み護岸に被災箇所がみられた(図4)。河川敷の公衆トイレや船着き場に甚大な浸水被害が生じていた(図5、図6)。

## b) 桂川松尾橋(調査日時：9.17 15:30), 桂川西大橋(調査日時：9.17 16:30)

桂川松尾橋周辺では、河川敷に繁茂する樹木群に洪水流が直撃し、根元から倒伏したり、河道へ流木となって流出しているのがみられた(図7)。河川敷には洪水の痕跡が確認された(図8)。周辺の水制群は平水時と異なり、全て水没していた。

桂川西大橋周辺でも同様に、河道の樹木群洪水流が直撃し、倒伏したり流出しているのがみられた(図9)。

## c) 桂川流域JR馬堀駅周辺(調査日時：9.19 10:00)

桂川流域JR馬堀駅周辺では、河道内で増水した水が水田や道路を流下した痕跡が明瞭に確認された

(図10)。トロッコ亀岡駅の痕跡水位やタクシーの案内板の汚れ具合から類推するに、3m程度の最大浸水深であったと考えられる(図11,12)。堤内地にも洪水痕跡がみられ、図中の駐車していた車両も冠水したと考えられる(図13)。

## d) 由良川 福知山市音無瀬橋(調査日時：9.19 14:00), 福知山市安井(調査日時：9.19 15:00), 福知山市大江町(調査日時：9.19 15:30)

由良川流域福知山市音無瀬橋周辺は十分大きな河積を有しているが、右岸側と左岸側の両方の河川敷に大きな洪水痕跡がみられた(図14,15,16)。

福知山市安井周辺では、道路を流下した痕跡が明瞭に確認された(図17)。地元住民からのヒアリングから、山からの内水氾濫により住宅の1階まで浸水被害が生じたことがわかった(図18)。

福知山市大江町では、堤内地にあるスーパーや大江支所に甚大な浸水被害がみられた(図19, 20)。



図1



図2



図3



図4



図5



図6



図7



図8

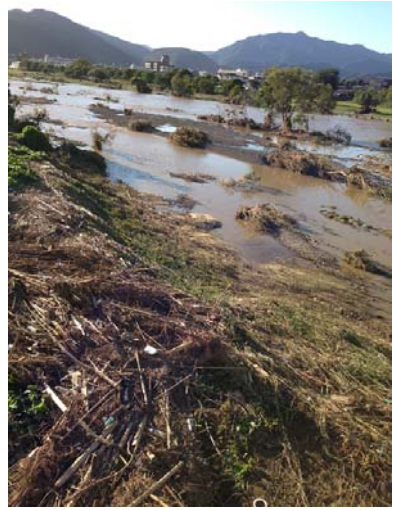


図9



図10(提外地)



図11(提外地)



図12(提外地)



図13(提内地)

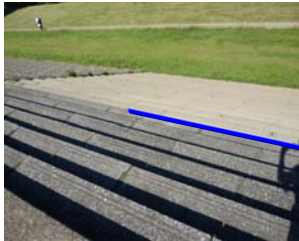


図14(左岸)



図15(左岸)



図16(右岸)



図17



図18



図19



図20

# 2013年9月京都・滋賀水害調査

竹林洋史<sup>1</sup>

Hiroshi TAKEBAYASHI

<sup>1</sup>正会員 博士（工学） 京都大学防災研究所 准教授（〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖東ノ口）

## 1. はじめに

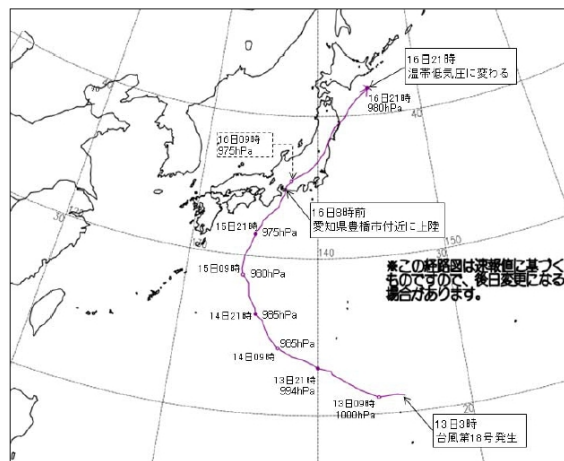
9月13日3時に小笠原諸島近海で発生した台風第18号は、潮岬の南海上を通過して16日8時前に暴風域を伴って愛知県豊橋市付近に上陸した。台風の接近・通過に伴い日本海から北日本にのびる前線の影響等で、四国から北海道の広い範囲で大雨となった。2013年9月18日10時30分現在の内閣府の情報及び平成25年9月18日6時現在の国土交通省の情報によると<sup>1)</sup>、この大雨と暴風、竜巻等により、土砂災害、浸水害、河川の氾濫等が発生し、岩手県、福島県、福井県、三重県、滋賀県、兵庫県であわせて死者3名、行方不明者5名となり、四国から北海道の広い範囲で損壊家屋800棟以上、浸水家屋5,000棟以上の住家被害が生じた。本調査は、土木学会水工学委員会の京都・滋賀水害調査団として、また京都大学防災研究所突発災害調査費のサポートを受け、2013年9月20日及び9月21日に現地調査を実施し、その調査結果の概要を示すものである。

主な調査地を図-1に示す。羽束師橋、嵐山、亀岡は外水氾濫、栗東市下戸山は斜面崩壊が発生していた。

## 2. 気象条件<sup>1)</sup>

図-2に台風18号の移動経路を示す<sup>2)</sup>。9月13日3時に小笠原諸島近海で発生した台風第18号は、発達しながら日

本の南海上を北上し、15日18時には暴風域を伴った。台風は、その後も北上を続け、潮岬の南海上を通過して、16日8時前に暴風域を伴って愛知県豊橋市付近に上陸した。台風の接近・通過に伴い、日本海から北日本にのびる前線の影響や、台風周辺から流れ込む湿った空気の影響、台風に伴う雨雲の影響で、四国から北海道の広い範囲で大雨となった。図-3に、9月15日～16日の最大1時間降水量、総降水量、9月の月降水量の平均値に対する今回の降水量の比の平面分布を示す。9月15日から16日までの総雨量は、三重県宮川で575.5mm、奈良県上北山で542.5mmとなるなど、近畿、東海地方を中心に400mmを超えたほか、統計期間が10年以上の観測地点のうち、

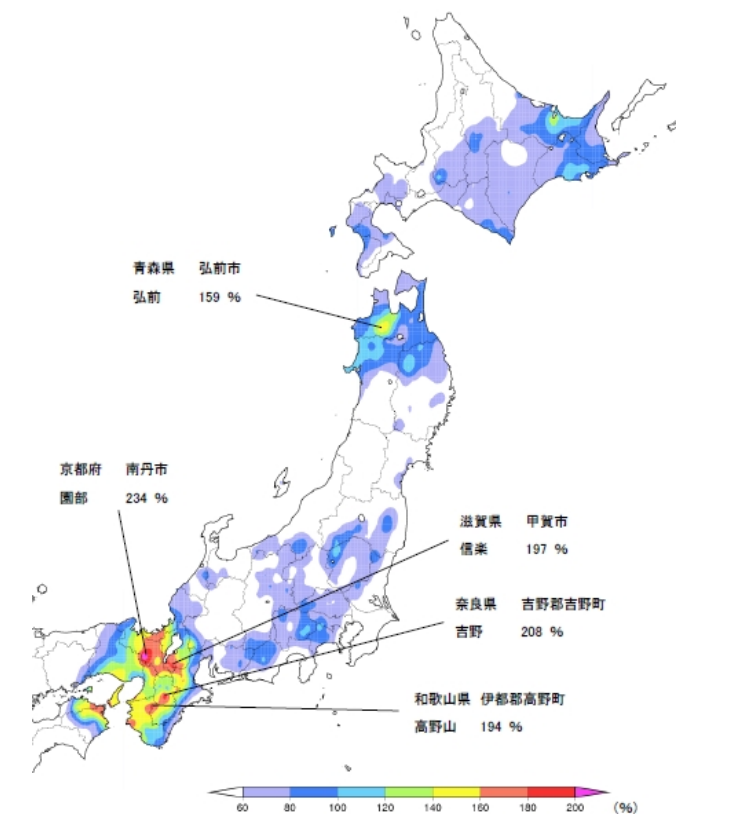
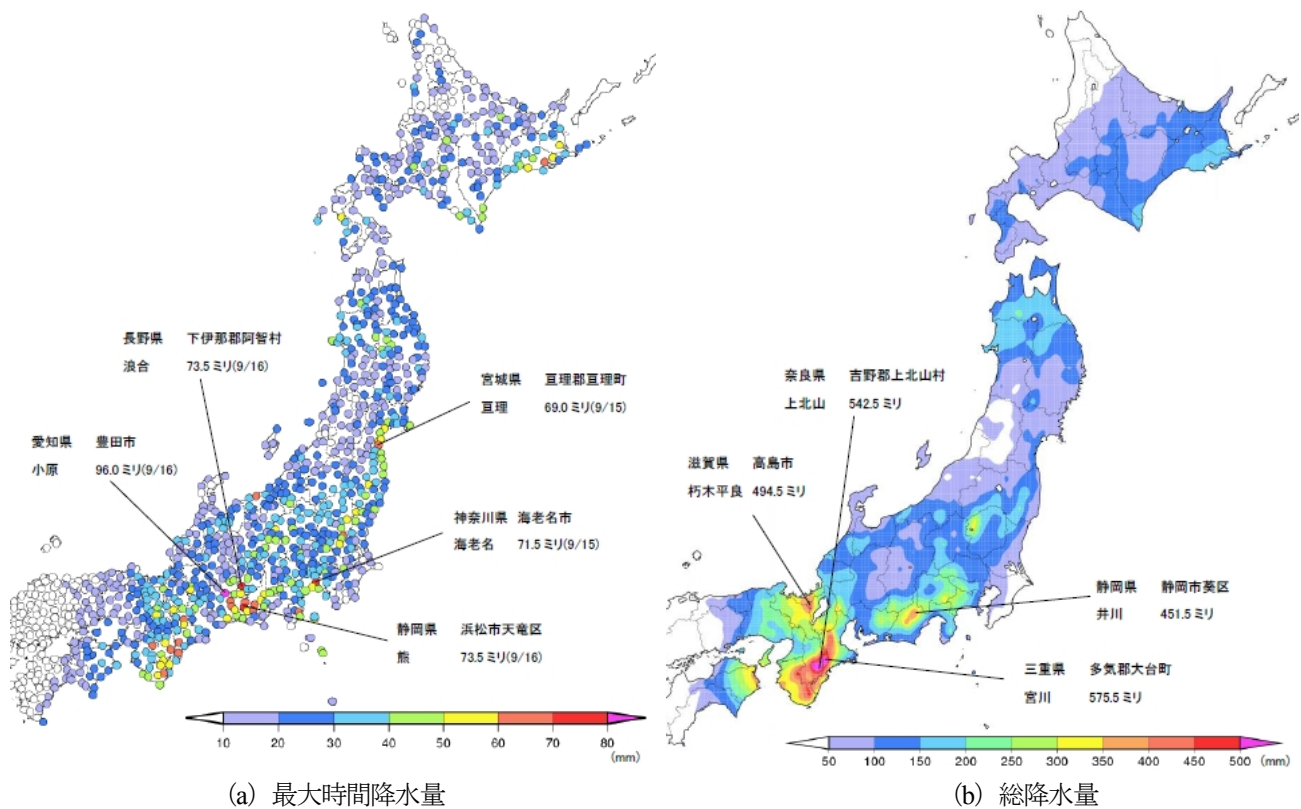


経路上の○印は傍に記した日の9時、●印は21時の位置を示す。

図-2 台風18号の移動経路



図-1 主な調査地



(c) 9月の月降水量平年値に対する9月15日・16日の総降水量の比

図-3 台風18号による降水特性<sup>1)</sup>

最大1時間降水量で13地点、最大3時間降水量で25地点、最大24時間降水量で35地点、最大48時間降水量で25地点が統計開始以来の観測史上1位を更新した。外水被害が発生した京都府桂川流域や斜面崩壊が発生した滋

賀県栗東市については、図-3(b)に示すように、総降水量は300mm程度と他の地区と比べてそれほど多くないが、図-3(c)に示すように、9月の月降水量の平均値に対する今回の降水量の比が大きな値となっており、その

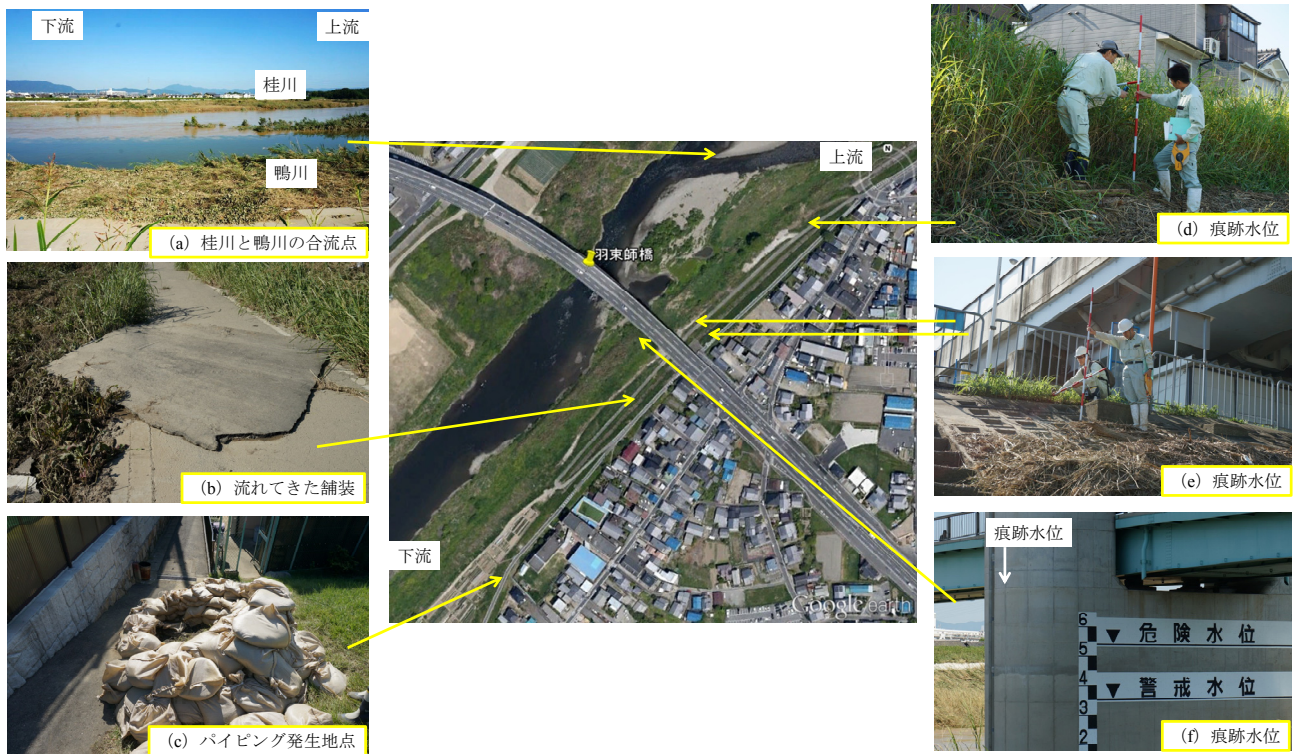


図-4 羽東師橋左岸域

地域では過去に経験したことがないような大雨となった。

### 3. 鴨川左岸域

#### (1) 羽東師橋左岸域

図-4に、羽東師橋左岸域の様子を示す。図-4 (a) に示すように、9月20日の時点では鴨川の土砂濃度は既に低下しているが、桂川の土砂濃度は依然として高いことがわかる。また、日吉ダムにおいて大量の流木が集積されたことと合わせて考えると、日吉ダム上流域で多くの斜面崩壊が発生し、土砂が河川に供給されたことが予想される。

図-4 (b) はアスファルト舗装が流れてきた状況である。アスファルトは比重が1~2の間であり、土砂などに比べて非常に小さい。また平板状であるため、流水によって流出しやすい特性がある。

図-4 (c) は羽東師橋下流の左岸域で見られたパイピングの跡である。月の輪工法によって堤内地の水位を上げ、破堤を防いだようである。

図-4 (d) ~ (f) は堤防及び橋脚に見られた痕跡水位である。羽東師橋左岸側は、桂川の湾曲の外岸側に位置している。そのため、上流側の図-4 (d) では堤防天端から痕跡水位まで120cmであったが、橋脚付近の図-4 (e) では堤防天端から痕跡水位まで60cmとなっていることがわかる。図-4 (f) を見ると、痕跡水位は危険水位を約1m上回っていることがわかる。

#### (2) 羽東師橋上流左岸域

図-5に、羽東師橋上流左岸域の越水地点の様子を示す。越水は、図-5 (a) に示す地点で発生した。図-5 (a) は越水を防ぐための土のうを示す。この地点は周辺よりも若干堤防高さが低くなっている。また、越水地点のすぐ下流左岸側に水門開閉用の龍門橋が設置されている。龍門橋には多くの流木とゴミが引っかかったようであり、パワーショベルによる除去が行われていた。つまり、本地点での越水は、堤防天端が低いことと龍門橋に流木やゴミが引っかかることによる河積の減少による水位上昇が原因と考えられる。被災者の話によると、越水した時間帯は9月16日午前であり、図-5 (c) に示すように、越水の最大水深は約50cmと考えられる。また、図-5 (d) に示すように、越水地点から約80m東の地点での最大水深は約30cmであった。この地点の地盤は東へ下りの勾配を持っており、ある程度の流速を有して約30cmの深さで流れたと考えられる。なお、この周辺ではマンホールや側溝の蓋の流出、電柱の破損、側溝周辺の地盤の浸食などが確認された。

### 4. 嵐山

#### (1) 渡月橋

図-6に渡月橋の様子を示す。今回の出水の最高水位時には、兩岸付近の橋桁まで水が達したことが確認されている。図-6 (c) は橋桁の装飾の破損の様子がわかる。このような破損は、兩岸付近にのみ見られた。これは、図-6 (b) に示すように、橋桁が上に凸の形状となっており、兩岸付近で低く、河道中央付近で橋桁が高くなっ





図-5 羽東師橋上流左岸域



図-6 渡月橋

ているためと考えられる。また、このような構造は、水平な橋桁の橋梁よりも橋の流出や橋桁による水位上昇の

抑制には有利である。つまり、河岸付近の橋桁が水に浸かり始めても河道中央付近の橋桁は水面の上であり、河



図-7 渡月橋両岸付近

岸付近で流下を抑制された流れの一部を河道中央で流下させることが可能であるとともに、橋梁上流域の水位上昇を抑制できる。河岸と同じ高さの水平な橋桁の場合は、河岸付近の橋桁が水に浸かり始めると河道中央付近も同時に水に浸かり始め、橋桁上流域の水位は急激に上昇するとともに、橋桁に架かる水圧が高くなり、橋桁が流出しやすくなる。

渡月橋は、景観にも配慮した構造となっており、その対策も取られている。図-6 (c) に示すように、渡月橋は4本の柱が一組となって、一箇所の橋脚を構成している。このような構造は流木が引っかかって橋梁の架かる流体力を増加させ、流出の危険性を高めるため、現在の設計基準では推奨されていない。このような構造に対する対策として、図-6 (b) に示すように、流木止め（流木避け）が橋脚の上流約2mの所に設置されている。流木止めによって、先に流木を捕捉し、橋脚本体に引っかかる流木を減少させるとともに、上方の空間の自由度が大きい場所（橋桁の無い場所）で流木の向きを変え、橋梁断面で流木を通過させやすくする効果があると考えられる。また、図-6 (c) に示すように、橋脚底部におい

ては、4本の柱を連結させており、橋脚の強度を高めるとともに、流木の引っかかりを最小限にしていることが分かる。

## (2) 渡月橋左岸

図-7に渡月橋周辺の桂川両岸での様子を示す。図-7 (d) に示すように、電灯に残された傷跡から、一の井堰上流では約160cmの深さで越水した可能性がある。図-7 (a) に示すように、観光船の乗船場付近の護岸は沈下していた。また、図-7 (a) に示すように、地盤が浸食されて樹木の根が露出した箇所や図-7 (f) のように樹木が流出した箇所も見られた。渡月橋下流域では、図-7 (e) に示すように砂利がほとんど流出し、砂利の下の地盤が露出している箇所が見られた。しかし、図-7 (c) に示すように、発災からわずか4日後の9月20日の時点で左岸側のお土産物店はほとんど開業しており、観光客も非常に多かった。

## (2) 渡月橋右岸

ピーク流量時は、中の島は完全に浸水したようであり、

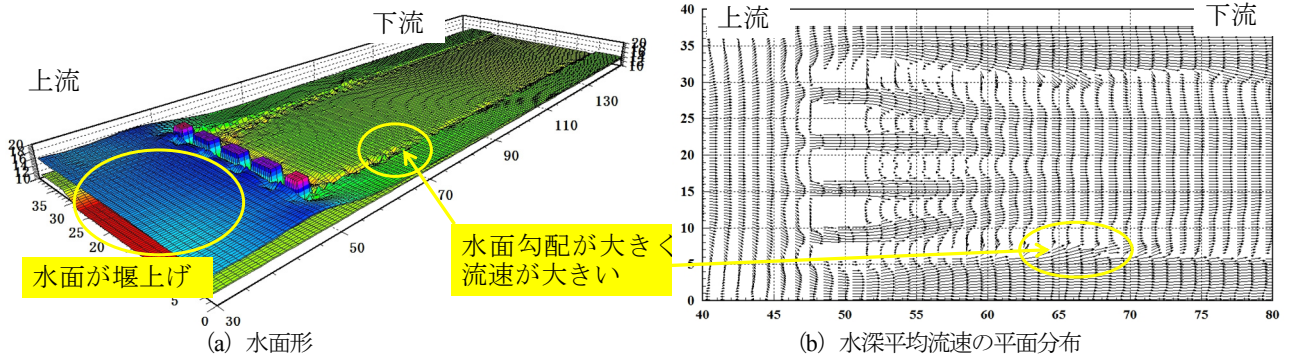


図-8 橋梁周辺の迂回流の計算例



図-9 亀岡駅周辺

図-7 (g) に示すように約60cm程度の深さの浸水痕が見られた。また、6号井堰上流左岸側の護岸が大きく破壊していた。この部分は、河岸が北へわずかにせり出しており、渡月橋の下を流れた水の水衝部となるところである。また、渡月橋右岸から迂回して中の島を流れた迂回流が桂川に戻る地点に相当していた可能性もある。図-8は平面2次元流れの基礎方程式を用いて再現された橋梁周辺の迂回流の数値解析の例である。なお、本解析は渡月橋の水理条件で行われたものではない。橋脚には流木等が引っかかり、橋脚断面における断面障害率が63%の状態である。橋梁上流域において水面の堰上げが発生し、橋梁両岸での水面勾配が大きくなり、迂回流の流速が大

きくなっている。また、迂回流が本川へ戻る地点は、水面勾配が急で流速がさらに大きくなるため、護岸が破壊されやすい。図-8 (h) で示された地点はちょうど迂回流が桂川本川に戻った地点の可能性がある。

## 5. 亀岡

### (1) 亀岡駅周辺

図-9に亀岡駅周辺の様子を示す。図-9 (a) は亀岡市・木下卓氏が9月16日午前5時頃に亀岡商工会館の2Fから北に向かって撮影した氾濫の様子である。トラック及機関

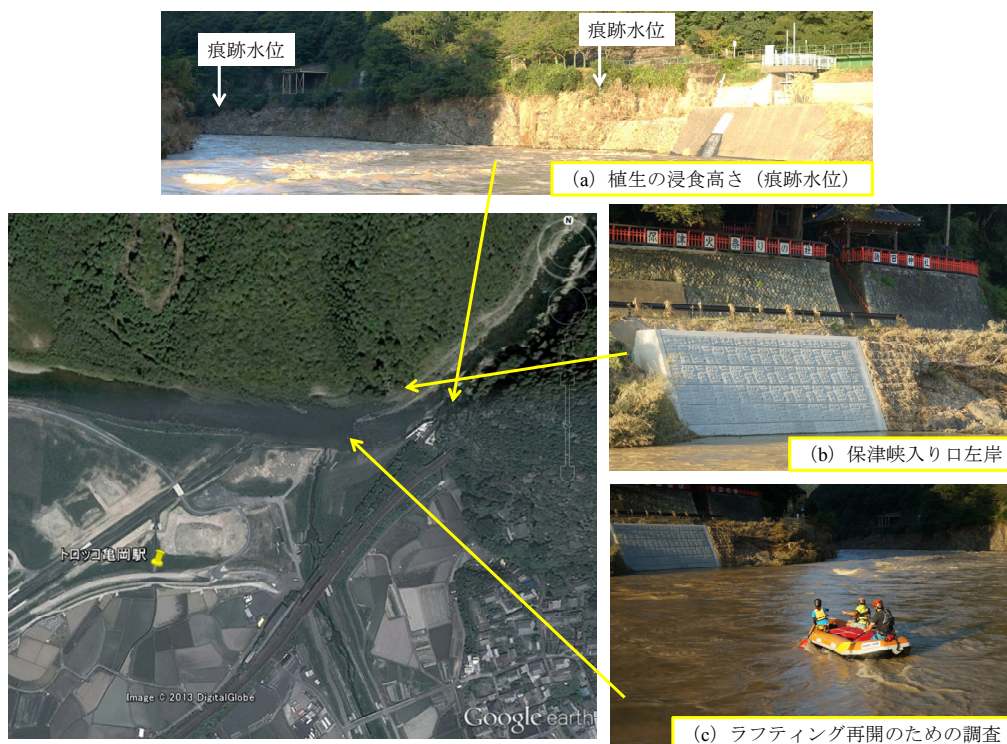


図-10 トロッコ亀岡駅(保津峡入口)周辺

車は、桂川左岸の堤防上に置かれていたものである。図-9 (d) は、図-9 (a) のトラックのすぐ東に置かれてた機関車である。これらより、最大で約1.2mの越流水深で洪水流が氾濫したことがわかる。なお、図-9 (f) に示すように、この地区の堤防には開口部があり、完全に閉めきっているわけではない。また、Google Earthの画像からも分かるように、桂川と亀岡駅の間は水田として利用されており、遊船乗り場の建物などはあるが、人家は見られない。つまり、この地区の堤防は、ある一定以上の洪水に対しては水を氾濫させる霞堤となっていることがわかる。

図-9 (b) は曾ヶ谷川と桂川の合流点付近の橋の様子である。図より、橋の上流側に多くの浮遊物が引っかかっている。また、図-9 (d) より、機関車に引っかかっている浮遊物は、河川側や河川上流側ではなく、堤内地側に引っかかっている。これは、これらの領域において氾濫時の流れが、河道内からの流れよりも氾濫原からの流れが卓越していたためである。前述の図-9 (a) を見ると、浮遊物のトラックへの堆積状況やトラック周辺の水面の浮遊物を見ると、水の流れが写真の左奥から右手前方向であることがわかる。図-9 (a) 撮影時は、洪水ピーク流量に近い時間帯であり、流向が氾濫原から桂川河道方向に向かっていたことがわかる。

図-9 (e) は、保津川下りの遊船置場を開削している様子である。普段は、遊船乗り場の対岸の砂州を開削して、遊船置場としている。対象地点は、湾曲内岸に形成された砂州であるため、土砂が堆積しやすい場所である。そのため、今回の出水により、遊船置場に土砂が堆積し

ため、早急に開削を実施していたものと考えられる。

図-9 (c) は、亀岡駅南に設置されている水害標識塔である。今回の出水では、標識塔設置場所の地盤高程度の高さまでしか水は来ていない。しかし、後の解析で示すように、日吉ダムによって洪水ピーク流量をカットしていなければ、水害標識塔で示された最高水位を超えた可能性もある。

図-9 (h) は亀岡駅北のロータリー周辺に堆積した浮遊物である。最高水位時には、北ロータリーもわずかに水が浸かったとのことである。

図-9 (g) は、亀岡駅南側地区のイオン亀岡店の南に位置する交差点である。この交差点は、地盤高が低くなっており、痕跡水位から約1mの深さで浸水したことがわかった。

## (2) トロッコ亀岡駅（保津峡入口）周辺

図-10にトロッコ亀岡駅（保津峡入口）周辺の様子を示す。図-10 (a) は保津峡入口付近の右岸側に残った植生の浸食高さ（痕跡水位）である。図より、保津峡に入って行くに従って、浸食高さが急激に低くなっていることが分かる。これは、勾配の緩やかな亀岡盆地に貯留した速度水頭の小さい水の流れが、川幅が狭くて勾配が急な保津峡に流れ込み、位置水頭が速度水頭に変換されて、水位が急激に下がっていることを示す。この結果からも、亀岡盆地の広い領域に洪水が氾濫し、氾濫水の流速が遅かったことがわかる。

図-10 (b) に示すように、保津峡左岸側の道路は少なくとも50cm以上は冠水したことがわかる。

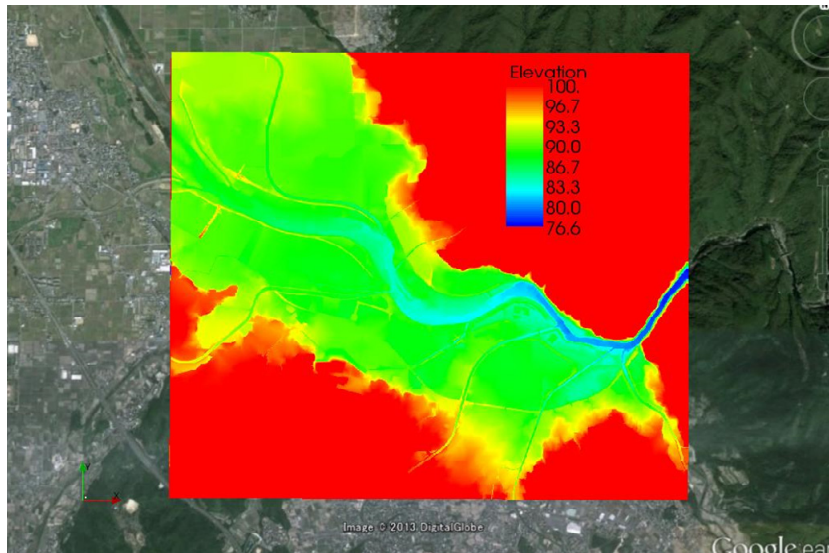
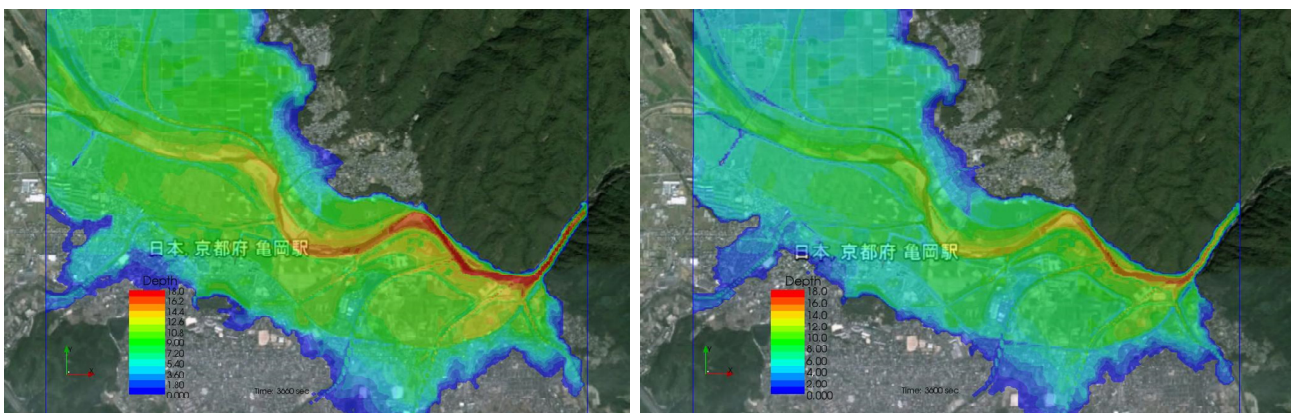


図-11 解析に用いた地盤形状



(a) 4700m<sup>3</sup>/s

(b) 3200m<sup>3</sup>/s

図-12 水深の平面分布(数値解析, 背景画像はGoogle Earth)

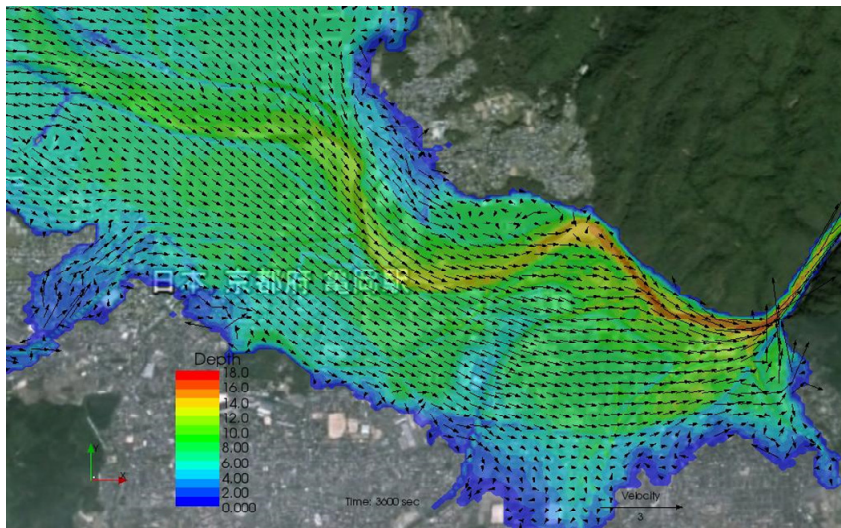


図-13 3200m<sup>3</sup>/sの時の水深平均流速と水深の平面分布(数値解析, 背景画像はGoogle Earth)

図-10 (c) は、ラフティング業者によるラフティング再開のための調査の様子である。ラフティング業者によると、翌日の9月21日からの営業再開のための事前調査ということであり、ラフティングは比較的短期間で営業を再開できることがわかる。

### (3) 亀岡盆地の氾濫解析

本出水による保津橋地点の桂川のピーク流量は3200m<sup>3</sup>/sと考えられている。一方、(独)水資源機構によると、日吉ダムによる貯水によって、ピーク流量は1500m<sup>3</sup>/sカットされている。そこで、Case 1として3200m<sup>3</sup>/s、Case 2として4700m<sup>3</sup>/s (3200m<sup>3</sup>/s+1500m<sup>3</sup>/s)



図-14 栗東市下戸山地区の斜面崩壊

の定常給水条件における氾濫範囲及び浸水深の平面分布を平面二次元流れの数値解析によって計算した。図-11に地形データを示す。地形データは、国土地理院による5mメッシュデータを用いた。解析格子は、約20m×約20mである。水が流出する保津峡の下流端水深は等流水深とした。マンギングの粗度係数は0.035（単位：長さm、時間にs）を空間的に一様に与えた。

図-12に浸水深の平面分布を示す。図-12 (a) のイオン亀岡店南の交差点付近を見ると、約2mとなっており、実測データよりも大きな値となっている。これは、流れを非定常流れでは無く定常流れとして計算していること、国土地理院による5mメッシュデータであるため、最も河床位が低い流路内の地形が適切に評価できていない可能性があること、適切なマンギングの粗度係数の値が与えられていないこと、解析格子が大きく、保津峡の河道内の横断方向のメッシュ数が少なくなり、水が流出しにくい条件となっていた可能性があること等が考えられる。これらについては、今後、詳細なデータを収集して再検討を行う。

図-12 (a) と (b) の浸水域の平面分布を比較すると、4700 m<sup>3</sup>/sでの計算結果の方が3200m<sup>3</sup>/sでの計算結果よりも浸水域はわずかに広がっているが、流量に1.5倍の違いがあるにもかかわらず、両者に大きな違いはない。これは、氾濫域の南北および東側の境界付近は、地盤高が急激に高くなっており、流量が増加しても水深が増加す

るだけで平面的に水が広がることができないためと考えられる。なお、氾濫域の最大浸水深の両条件での違いは約2.4mであり、一般家屋の1フロア程度の高さである。ただし、この値についても、前述のような理由で実際にはこれよりも小さい値となると考えられる。

図-13に水深平均流速の平面分布を示す。亀岡には、天然記念物のアユモドキが生息している。密漁の危険があるため正確な場所を示すことはできないが、本解析結果より、アユモドキの産卵場付近における水深平均流速は、約1m/sであった。亀岡市環境政策課によると、6月の産卵により生まれた個体は既に十分な遊泳能力を持っており、今回の出水スケールで保津峡まで流されてしまった個体は非常に少ないと考えられるとのことである。また、曾ヶ谷川河口付近及びその北側の堤防については、水の流れが氾濫原から桂川に向かっていることがわかる。これは、図-9 (a) の流向と一致している。

## 6. 栗東市下戸山

図-14に栗東市下戸山地区の斜面崩壊の様子を示す。今回の豪雨により、安養寺では下古山地区の南斜面だけではなく、北斜面や西斜面でも斜面崩壊が発生している。安養寺山は山裾からの高さは約100mであり、南斜面では3箇所斜面崩壊が発生しており、全て、山頂に近い

高さから発生していた。図-14 (b) に示す最も西の斜面崩壊による土砂が家屋に衝突し、1名の方が亡くなっている。斜面崩壊の大きさは、幅約20m×深さ約3mである。斜面崩壊は、9月15日23時45分ごろ発生し、2階建て家屋の1階に1名、2階に1名がいた。亡くなられたのは1階の1名であり、2階の1名は大きな怪我もなく無事であった。

図-14 (b) の重機の右に移っている家屋は、被災した家屋の2階部分である。2階家屋の損傷がそれほど大きくないこと等から、家屋に衝突した時点での土砂の流動深は、2.5m以下程度であったと考えられる。図-14 (d) に示す斜面崩壊が最も規模が大きく、4箇所斜面からの崩壊が一つに集まって山裾に流れてきている。被災現場付近の方の話によると、崩壊は少なくとも4回に分かれて発生しており、4箇所の斜面崩壊と一致している。1回目は、16日夜中0時以降であり、4回目は16日午前2時30分より前とのことである。16日の早朝の時点では、山裾の家屋は傾いておらず、その後の土砂の流出によって傾いたとのことであった。こちらの斜面崩壊は、山裾部分で幅約20m×深さ約3mであった。最も東の斜面崩壊は、五百井(いおい)神社の裏斜面で発生していた。この崩壊は、他の崩壊と比べて幅は若干狭く、深さは若干深かった。

図-3 (a) と (b) に示すように、栗東市周辺は、9月15日～16日の1時間最大雨量は30～40mm。積算降水量は300mm～350mmと比較的大きな値であるが、他の地域と比べて特別に大きな値ではない。一方、図-3 (c) に示すように9月の月降水量平年値に対する9月15日・16日の総降水量の比を見ると、180～200%の領域に位置しており、最も値の大きい地域の一つとなっている。つまり、栗東市下戸山地区は、他の豪雨常襲地帯であれば既に崩壊している斜面であり、これまであまり強い雨を受けていなかったため、斜面崩壊が発生した可能性がある。また、安養寺山は、かつてマンガンやウランの鉱山であり、西の斜面崩壊発生地点の山裾に坑道の入口がある。鉱山は1963年にすでに閉鉱している。現時点では十分な情報は収集できていないが、鉱物採取時の廃土を安養寺山に捨てていたのであれば、比較的崩壊しやすい斜面となっていた可能性もある。

## 7. おわりに

2013年9月に発生した台風18号による京都・滋賀水害に対する災害調査の結果を報告した。本調査により、河道内構造物への流木・ゴミの集堆積による氾濫の助長の可能性、橋梁を迂回する流れの危険性、狭窄部上流域の盆地における氾濫の特徴、過去の豪雨経験の少ない場における斜面崩壊発生の危険性等について興味深い知見が得られた。本報告は速報版であり、ここに記載されたものの一部は、現時点では十分に検討できていない。これらについては、今後詳しく検討が行われる予定である。

## 謝辞

本調査では、京都市羽束師橋周辺、渡月橋周辺、亀岡市、栗東市下戸山地区の皆様には、被災からの復興にお忙しい中、親切にご対応頂き、被災時の詳細な情報をご提供頂いた。京都府南端土木事務所、亀岡市環境政策課、京都大学防災研究所・角哲也教授、堀智晴教授からは、調査の前に現地の状況について情報をご提供頂いた。寒地土木研究所の阿部孝章氏には、亀岡盆地の氾濫解析のサポートを頂いた。また、京都大学防災研究所突発災害調査費、土木学会水工学委員会水害対策小委員会調査費(建設技術研究所、パシフィックコンサルタンツ、アジア航測、日本工営、建設環境研究所(株)、ドーコン、株式会社パスコ、日水コン、八千代エンジニアリング)のサポートを受けて実施された。ここに記して、関係各位に御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 国土交通省気象庁：台風第18号による大雨，2013。
- 2) 国土交通省気象庁：台風経路図2011，2011。
- 3) 国土交通省：川の防災情報 (<http://www.river.go.jp/>)。

# 2013年台風第18号による由良川氾濫調査報告

三輪 浩<sup>1</sup>・川合 茂<sup>2</sup>

<sup>1</sup>工博 舞鶴工業高等専門学校教授 建設システム工学科 (〒625-8511 京都府舞鶴市白屋234)

<sup>2</sup>工博 (株)東京建設コンサルタント顧問 (〒530-0042 大阪市北区天満橋1-8-63 トーケン大阪ビル)

## 1. まえがき

2013年9月13日未明に小笠原諸島の近海で発生した台風第18号(以下、台風18号とする)は、日本の南海上を北上し、9月16日早朝に965hPaの最低気圧を記録、同日8時前に愛知県豊橋市付近に上陸した。その後、熊谷市付近、仙台市付近を通過し、同日21時に北海道の東の海上で温帯低気圧に変わった。

この台風18号により京都府および滋賀県でも記録的な豪雨となり、最初の特別警報である大雨特別警報が発表された。各地で土砂災害や浸水被害が多発し、京都府北部の由良川流域では、主として福知山市と舞鶴市において住宅の浸水、道路の損壊、農作物の被害などが広範囲にわたって発生した。由良川では2004年にも甚大な洪水災害が発生しており、わずか9年の間に2度も計画規模の洪水が発生し、とくに、今回は福知山地点で計画高水位を越える水位を記録した。2004年の水害以降、堤防整備が進められていた最中の災害であった。今回の洪水による被害状況や浸水経路を把握するために、著者らは9月21日、23日および25日に現地調査を実施し、9月22日に現地視察を行った。本文では、まず、降雨および河川水位の概要を述べ、ついで福知山市と舞鶴市の被災地区での調査結果について報告する。また、今回の洪水による被害と出水状況等について、2004年10月に発生した台風第23号(以下、台風23号とする)と比較しながら分析する。最後に、今後の河川整備の計画と現時点での整備状況について言及する。本文を作成するに当たり、2章、3章および5章の現地調査と執筆は三輪が担当し、4章の今回と9年前の洪水の比較と執筆は川合が分担した。なお、4章作成に際しては芦田和男京都大学名誉教授から有益な助言を得ている。

## 2. 降水および河川水位の概要と沿川三市の対応

由良川は京都、滋賀、福井の府県境にある三国岳を水源とし、西に流れて福知山市で土師川と合流したのち北東に転じ、舞鶴市と宮津市の市境において日本海に注ぐ、幹線流路延長146km、流域面積1,880km<sup>2</sup>の一級河川である。渓谷や河岸段丘が発達している上流部は勾配が急で流れも速いが、福知山盆地を流れる中流部(綾部～牧川

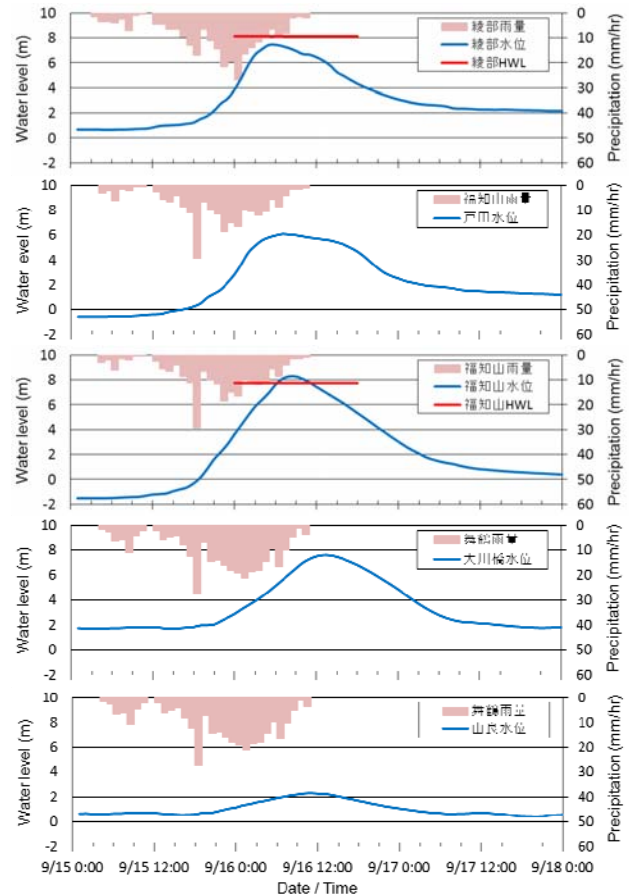


図-1 綾部から由良までの各観測地点での雨量と水位変化 (気象庁、国交省データより作成)

合流部)は川幅が広く、勾配も緩くなるため流れは遅い。狭隘な谷底平野を流れる下流部(牧川合流部～河口)は河幅が狭く、勾配もさらに緩い。このため、上流部から流下してきた洪水が中流部で溜まりやすい地形となっており、これまで中・下流部では水害が頻発してきた。今回の洪水氾濫は2004年10月の台風23号以来の大規模なものとなった。

図-1は綾部、戸田、福知山、大川橋(河口から7km)および由良(河口から0.35km)における雨量と河川水位の変化を示している。綾部、福知山および舞鶴の降り始めからの総雨量はそれぞれ278mm、216mm、298mmで、いずれの地点でも9月の平年値(それぞれ183.6mm、189.2mm、207.7mm)を1日あまりで超えた。一方、水位は、綾部で7.45m、福知山で8.30mに達し、いずれも台風23号



表-1 由良川沿川3市の避難情報伝達の流れ

月 日	時 分	全域	綾部市 (市役所聞き取り)	福知山市 (市災害記録暫定版)	舞鶴市 (市役所資料)
9月15日	16 26	大雨洪水注意報			
	19 15	大雨警報			
	23 6	洪水警報			
9月16日	1 10			避難準備情報 土砂災害警戒情報(夜久野以外)	土砂災害警戒情報(市全域)
	30				
	45		避難準備情報 (沿川5町)		
	2 0			避難勧告 (由良川流域)	避難準備情報
	20				
	3 50		避難指示 (沿川10町)		
	4 30		避難指示追加 (4自治会)		
	5 5	大雨特別警報			
	17	大雨(土砂災害)警報			
	29		避難指示 (市全域)		
	40			避難指示 (市全域)	
	6 45				避難勧告 (市全域)
	9 58	大雨特別警報解除			
	13 39	大雨警報解除			
	17 45		避難指示解除		
19 39	洪水警報解除			避難勧告解除	
9月17日	40			避難指示解除 (遷喬, 大江町以外)	
	23 6	大雨注意報解除			
	12 51	洪水注意報解除			
14 40			避難指示解除 (遷喬, 大江町)		

の時よりもそれぞれ57cm, 75cm高い値を示した。とくに、福知山では計画高水位(7.74m)を約5時間にわたって超えており、予断を許さない状態であったことがわかる。福知山のピーク水位を流量に換算するとおおむね5,400m<sup>3</sup>/s程度となり、台風23号(5,300m<sup>3</sup>/s)を若干上回る出水規模であったと推察される。なお、これらの流量には上流での氾濫流量は含まれていない。一方、大川橋の水位は7.60mで、台風23号の時よりも50cm低い値を示した。流量換算は約5,360m<sup>3</sup>/sとなり、後述するように、河口砂州を大きくフラッシュさせることとなった。

以上のような大規模な豪雨と洪水に対して、由良川沿川の綾部市、福知山市および舞鶴市は直ちに住民の安全確保を図っている。表-1は各市の住民避難に係る指示を時系列でまとめたものである。9月15日の19時15分に大雨警報が、同日23時6分に洪水警報が発表され、その後16日の2時までには3市とも避難準備情報を発表している。そして、2時20分に福知山市が避難勧告を発表した。図-1よりこの時点で累積雨量は170mmを超え、河川水位は戸田で約4.6m、福知山では5mを超えていたことがわかっている。次いで、綾部市が3時50分に最初の避難指示を出している。図-1によると、このとき綾部の累積雨量は210mmを超えており、河川水位も7mに迫っている。大雨避難警報は5時5分に発表され、これを受けて5時29分に綾部市、5時40分に福知山市、そして6時45分に舞鶴市が市内全域への避難指示を発表している。このとき、綾部と戸田の河川水位はほぼピークに達しており、福知山では7mを越え、依然増加途上であった。後述するように、



図-2 浸水経路と被害状況の調査地域

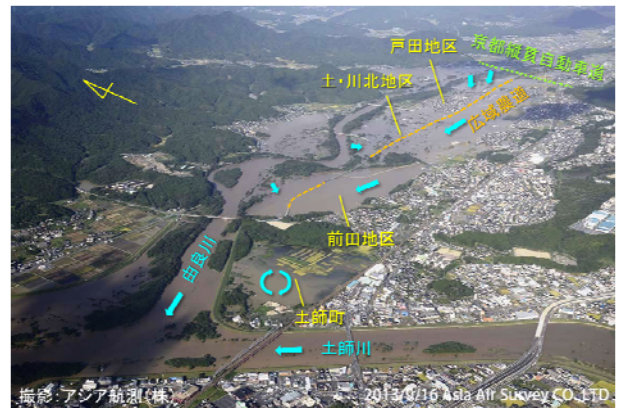


図-3 戸田地区～土師町の主な浸水経路

戸田地区付近には堤防の未整備区間があり、そこからの流入量もピークに近かったと考えられる。

綾部市と福知山市の避難指示に対して、いずれも約1,500人が避難所に避難した。朝日新聞の報道<sup>1)</sup>によると、避難指示対象者に占める割合は綾部市が23.6%であるのに対して、福知山市は1.9%であり、大きな差がある。詳細は今後の調査によらなければならないが、浸水区域の住人は戸外への避難が困難であることや自宅二階への避難が多かったのではないかと推察される。

### 3. 浸水経路と被害の状況

今回の洪水氾濫によって浸水被害を被った地域は、前回の台風23号と同様、由良川中・下流部である。綾部地区での住家の浸水被害はほとんどなく、今回現地調査を実施した左岸側では、図-2に示すように、主として福知山市の戸田地区～土師町、大江町、舞鶴市の志高～八田地区において河川からの流入による浸水被害が広がった。また、由良川河口では河口砂州の大規模な侵食が発生した。以下、各地区における浸水経路と被害の状況等について報告する。

#### (1) 福知山市戸田地区～土師町

図-3は戸田地区～土師町の主な浸水経路を示したもの

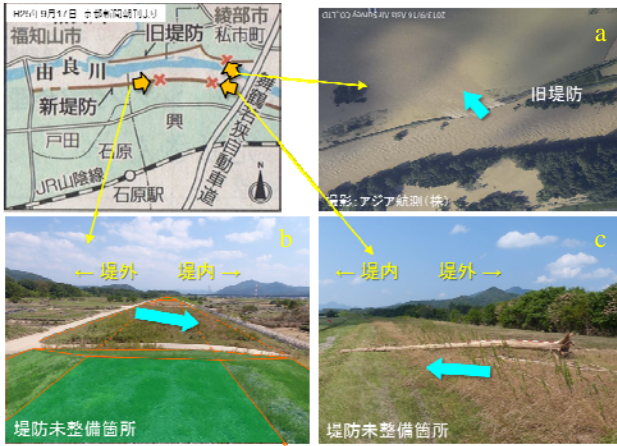


図-4 旧堤防の決壊および堤防未整備箇所(9/25)からの河川水の流入



図-5 戸田地区周辺の民家浸水痕跡と道路破壊状況(9/23)



図-6 土・川北地区周辺の浸水痕跡と農地の被害(9/23)

である。由良川の土師川合流点から直上流の地区では多くの浸水被害が発生した。旧堤防が決壊した私市町(図-4a)の他、浸水域は主に京都縦貫自動車道より西側の広域農道に沿って拡がっている。この地域の主な浸水形態は大きく3つに分けられる。すなわち、戸田地区と土・川北地区の浸水は、主として堤防未整備箇所からの流入(図-4b, c)によるものであり、戸田地区は住宅地の床上



図-7 前田地区の旧堤防および農地の浸水状況(9/23・25)

浸水や道路損壊(図-5)、土・川北地区は主に農地が被害に遭った(図-6)。浸水高さは大きいところで2m程度にも達しており、地元住人によると台風23号のときよりも40~50cm程度大きかったとのことであった。一方、前田地区は上流の土・川北地区からの流れ(図-7a)に加え、同地区の旧堤防からの流入痕跡(図-7b, c)があり、双方の流れが広域農道で重なったことが氾濫痕跡から確認されている。浸水域は主に農地であり、浸水深は3mを十分に越える程度であったと推察される(図-7d, e)。さらに、道路損壊も発生した(図-7f)。なお、南部の住宅地は高台にあるため浸水を逃れている。図-8は土師町の浸水状況の一例である。この地区は樋門閉鎖による内水氾濫が発生しており、民家はほとんどなく、農地が冠水した。



図-8 土師町の浸水(9/25)

## (2) 福知山市大江町~大雲橋(図-9)

大江町では蓼原・新町地区の地盤が低く、浸水深は2mを優に超えるケースが少なくなかった。これらの地区の浸水は公庄地区の堤防未整備箇所からの流入によるもの(図-10a)で、近くの北近畿タンゴ鉄道(KTR)宮福線も一部冠水した。公庄では床上浸水(図-10b)となったが蓼原地区の浸水は2m62cmにまで達し、これらの地区では台風23号のときよりも約30cm高い(図-10d)。また、蓼原・新町地区には浸水した家財道具の集積所がいくつも設置されており、被害の大きさを示している(図-10c)。一方、



図-9 大江町公庄～蓼原・新町地区～宮川合流点～大雲橋



図-10 公庄地区の堤防未整備箇所と浸水痕跡、廃棄される家財道具(新町) および民家の浸水痕跡(蓼原) (9/21)



図-12 志高地区～大川地区～八田地区

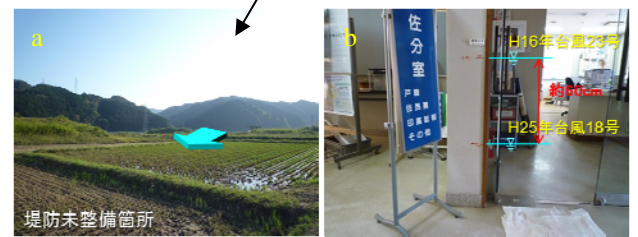


図-13 志高地区の堤防未整備箇所と市役所分室の痕跡 (9/21)



図-14 大川地区および八田地区の浸水状況 (9/21)

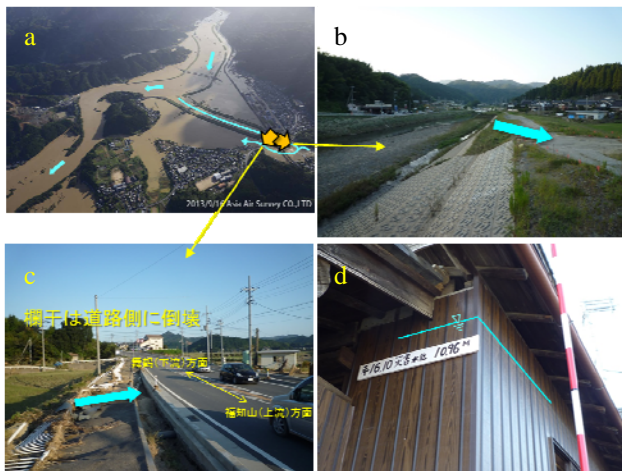


図-11 宮川合流点、宮川からの越水箇所、歩道と欄干の損壊 および大雲橋付近の民家 (9/21)

宮川合流部の浸水は、由良川の水位が上昇したことによって宮川の水位をせき上げ、上流左岸側の無堤区間から田畑に流入したものである(図-11a, b)。これによって、歩道と欄干が損壊した(図-11c)。また、宮川より下流の大雲橋では水位は台風23号よりも低かったが、一部の家屋では高い浸水痕跡を残した(図-11d)。



図-15 志高地区および大川地区の防災行政無線 (9/21)

(3) 舞鶴市志高地区～八田地区 (図-12)

志高地区の浸水も堤防未整備箇所からの流入によるものである(図-13a)。舞鶴市役所加佐分室の浸水高さは台風23号よりも約60cm低く(図-13b)、大江町より上流の地区とは逆の傾向となっている。また、志高地区の直下流側の大川地区でも民家が床上浸水被害を被っている(図-14a)。さらに、由良川河口付近の八田地区でも堤防未整備箇所からの流入によって1m以上の浸水となっている。ただし、浸水高は台風23号のときよりも約40cm低い(図-14b)。

これらの地区では、由良川沿いを中心に災害情報を流



図-16 平水時と洪水時の河口砂州 (国交省福知山提供)

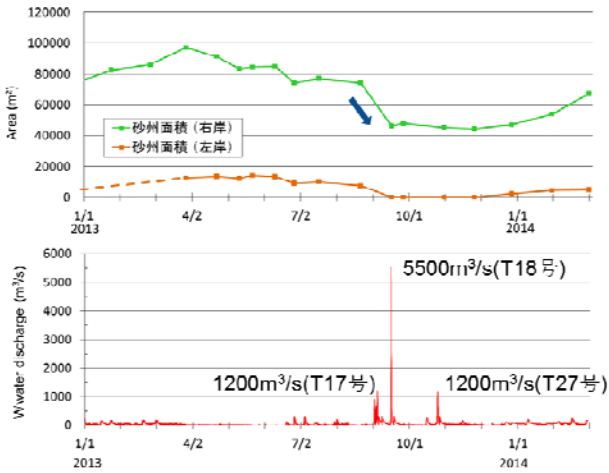


図-17 河口砂州面積と河川流量(福知山)の変遷

スピーカー付きの防災行政無線が29基設置されている。この内、今回の出水で4子局が水没により使用不能となった。これは制御箱が地上2m程度の位置にあり、約3mの浸水高さに対して不十分であったことにも起因している(図-15)。

#### (4) 由良川河口

由良川には河口砂州が発達しているが、図-16aに示すように、2004年の台風23号の際に左岸側の砂州は侵食・消滅し、その後右岸側のみが発達するようになった。図-17は筆者らが実施している河口砂州の動態観測結果<sup>2)</sup>で、砂州面積と福知山での河川流量の推移を示している。2012年12月頃から左岸側にも砂州が形成され始めたが、今回の出水によって図-16bのように再び大きく侵食され、左岸の砂州は消滅し、右岸の砂州面積は約40%減少した。図-1に示された由良の水位は最大2m程度上昇しており、別途観測した砂州高さが1.5m規模<sup>3)</sup>であることから、ピーク水位時には河口砂州は水没していた可能性がある。今後、河床の変動状況によっては左岸側の河岸侵食が懸念され、保全対策を考える必要がある。なお、河口砂州の発達には冬期波浪の影響を受ける<sup>3)</sup>ことが分かっており、2014年3月時点で右岸側の砂州面積はおおむね出水前の規模にまで増加していることを確認している。

### 4. 今回と2004年台風23号時の洪水の比較

#### (1) 被害状況

主要な浸水地域を図-18の流域図に閉曲線で示す。下



図-18 由良川流域概要と浸水地域



図-19 志高地区の浸水状況と堤防(国交省福知山提供)

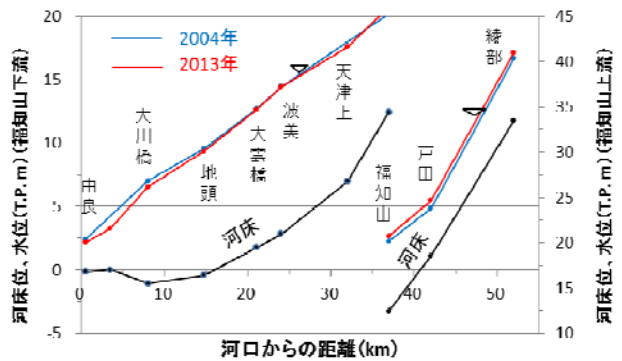


図-20 2013年と2004年の最高水位の縦断変化

流部の舞鶴市から綾部市に至る、河口付近から44~45kmの広い範囲で浸水被害が生じている。いずれの地域も堤防等の整備途上地区で、堤防未整備区間から洪水流が浸入した。図-19に舞鶴市志高地区の浸水状況を示す。左岸側に整備中の堤防が見え、それがとぎれとぎれになっている状況が知られる。また、堤防完成地区で内水被害の発生したところもあった。一方、綾部市私市(右岸)では、小堤(旧堤防で未整備区間)のところで越水し、約100mにわたって破堤した。

浸水被害は、家屋数：約1,600戸(1,670戸)、面積：約2,500ha(2,600ha)であった。幸いにも死者は出なかったが、2004年と同じような浸水被害が発生した。なお、数値は国土交通省福知山河川国道事務所による調査結果で、カッコ内数値は2004年の被害を示す。



図-21 洪水到達時間内雨量の2013年と2004年の差

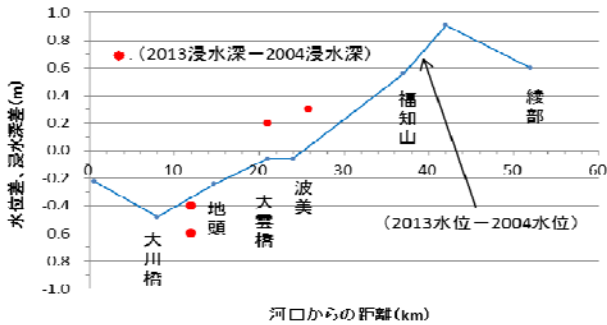


図-22 2013年と2004年の本川水位差と家屋浸水深差

## (2) 出水状況と降雨

図-20に今回（2013年）と2004年の最高水位の縦断変化を示す。河口から25km～35kmのところを境に、それより上流部の水位は今回の方が高くなっているのに対し、それより下流では2004年の水位の方が高くなっている。今回の水位は、綾部、福知山で55～60cm高く、大川橋では約50cm低くなっていた。また、水防団待機水位以上の洪水継続時間は今回の方が長く、下流部で1～2時間、中流部で3.5～6時間、綾部では約11時間長かった。こうした今回と2004年の出水の違いは雨によるものである。

流域を4分割した各流域（図-18）における流域平均の総雨量と最大時間雨量をみると、2004年の総雨量は上流域から下流域まで全域で300mm程度であるが、今回は上流域で320mmと2004年に比べて大きく、土師川流域および下流域で230～260mmとかなり小さい。最大時間雨量の2004年値は上・中流域で24～27mm、土師川・下流域で31～35mmと下流に向かうにしたがって大きな値であった。今回はこれとは逆で、上・中流域で30mm位、土師川・下流域で22mm位と下流域に向かって減少している。2004年は土師川流域や下流域でより強くより多い雨量であったのに対し、今回は上流域でより強く大量の雨が降ったことが知られる。図-21に洪水到達時間内雨量の今回と2004年の差を示す。洪水到達時間は2～3時間と推定され、同図は最大3時間雨量の分布を示している。赤が+で今回の雨量の多かったところ、青が少なかった領域である。上流域と中流域の東部で10～20mm多い。中・下流域および土師川流域では少なく、下流域西部では30～

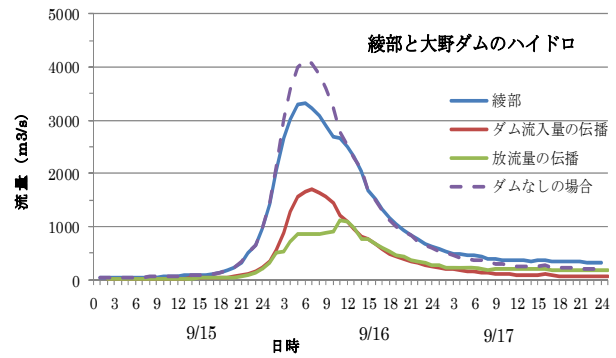


図-23 大野ダムの調節効果



図-24 山腹崩壊発生日安の条件を満たす雨量観測所

50mmも少なくなっている。2004年に比べて上流域での出水量が多く、土師川流域・下流域からの出水量の少なかったことが推察される。また、5mm/hr以上の降雨継続時間について流域内の各雨量観測所の記録を見ると、今回は18～23時間であるが、2004年は12～18時間であった。こうしたことから、図-20のように、2004年に比べて、今回の上・中流部の水位は高く、下流部で低くなり、洪水継続時間が長くなったものと思われる。なお、各雨量観測所における観測時間帯は今回も2004年もそれぞれにほぼ同じである。

## (3) 浸水深について

図-22に、今回と2004年の本川水位差と住家等の浸水深差を示す。赤丸が浸水深差で4軒のデータを示す。25.8k付近、21k付近では本川水位差を超えて浸水深差の方が大きく、12k付近では小さいことが知られる。これには、周辺の微地形や整備途上の堤防の影響が考えられる。このことについては、現地調査も含めてさらに検討を進めていきたい。

## (4) 大野ダムの効果について

上流部に大野ダムがある。図-23に綾部におけるダム効果を示す。青線が綾部の観測流量、破線がダム無の時の流量を示す。赤および緑の線はダム流入量と放流量で、ダム地点から綾部までの洪水伝播時間を考慮している。ダムカット量は最大860m³/s程度で、洪水位低減効果は約60cm（国交省算出）であった。2004年の時の最大カット量は約500m³/sで約50cmの水位低減効果<sup>4)</sup>であった。今

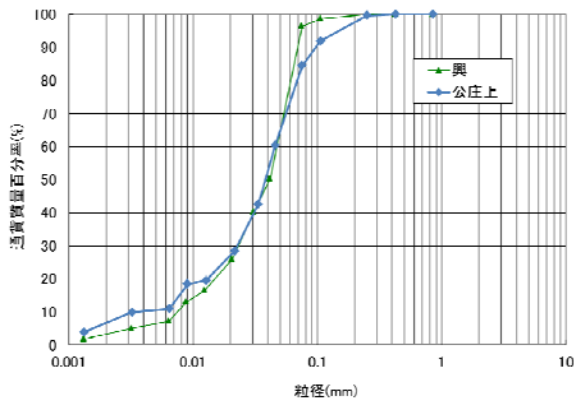


図-25 興と公庄上における微細土砂の粒度分布



図-26 私市地区の堤防緊急復旧工事 (2013/9/23) と現在の様子 (2014/6/6)

回は、大野ダム上流域での雨量が多かったため、ダムの効果がより大きくなっている。ところで、「放流」という言葉は、人々に被害を助長させる要因のような誤解を与えるようである。表現を変える必要がある。

### (5) 微細土砂の流出について

今回は、2004年に比べて山腹崩壊がほとんど見られず、浸水域の微細土砂の堆積量が少なかったようである。図-24に山腹崩壊発生の目安とされる雨量（最大時間30mm以上，最大3時間70mm以上，最大24時間170mm以上）<sup>5)</sup>を満足する観測所を示す。▲が2004年，●が今回である。2004年は流域全体にわたって条件を満たしているが，今回は上流域のみに限られ，微細土砂の流出の少なかったことが説明される。

図-25は今回の出水直後に戸田（河口から約42km）および公庄上（河口から約28km）において採取した微細土砂の粒度分布である。これらはほぼ同様の分布を示しており，平均粒径は約0.05mmでウォッシュロード成分であることがわかる。

## 5. 由良川の河川整備計画と堤防整備等の状況

1997年の河川法の改正を受け，国土交通省は2003年8月に由良川水系河川整備計画を策定し，直轄管理区間（河口より54.1kmおよび土師川合流点より2.3km）に対して河川整備を進めてきた。これは，中流部については連続堤防の整備，下流部については住家を輪中堤整備や宅地嵩上げにより防御する水防災対策を行うものである。しかし，2004年10月の台風23号により，とくに下流部に



(1) 公庄地区 (2013/9/21, 2014/6/6)



(2) 大川地区 (大川橋下流) (2013/9/21, 2014/6/6)

図-27 由良川下流域における輪中堤整備工事の状況



図-28 宮川の河川改修(拡幅)工事，堤防整備工事の状況 (2013/9/21, 2014/6/6)

において大きな被害が発生したことを受け，下流部の施策を2014年までの概ね10年間で実施する由良川下流部緊急水防災対策が実施されてきた。その後，台風23号によって被害を受けた全ての地区を整備計画の対象として位置づけるため，2013年6月に国交省は新たな由良川水系河川整備計画を策定した。

このように，由良川中・下流部に対する河川整備が進められる中，2013年9月に台風18号が来襲し，本文で述べたとおり甚大な洪水災害が発生した。なお，今回の洪水で堤防が決壊した私市では直ちに緊急復旧工事が行われた（図-26）。その後，2013年11月29日に国土交通省は，河川整備計画の治水対策を大幅に前倒して実施するために，災害対策等緊急事業推進費を採択した。これによって，下流部では輪中堤の整備や宅地嵩上げ，中流部では連続堤防の整備や河道掘削等が概ね10年以内で実施されることとなった。図-27は公庄地区および大川地区の出水直後と現在の堤防整備の状況を示している。今後，宅地嵩上げを含む同様の工事が下流部の17地先で優先的に進められる。

河川整備の取り組みは京都府も行っている。図-28は



図-29 改善された志高地区の行政防災無線

宮川で実施されている拡幅工事と堤防整備の状況であり、京都府が担当する拡幅工事は今夏完了の予定である。また、今回の出水で水没した舞鶴市の防災行政無線も設置方法の改善が図られた(図-29)。

## 6. あとがき

2013年9月16日に来襲した台風第18号によって由良川が氾濫し、広範囲にわたる洪水災害が発生した。本文では、まず浸水の経路と規模、被害状況等について、現地調査の結果を示した。ついで、今回と2004年10月の台風第23号による被害と出水状況を比較することによって、今回の出水の特徴を分析した。

今後も各種のデータを調査・分析し、整備途上の洪水対策について考えて行きたい。なお、今回の出水において大野ダムによる洪水調整は有効であった。最後に、堤防等の整備完了後であれば、今回規模の出水に対しても越水することなく氾濫を防げたものと思われる。

**謝辞** 本調査にあたり、国土交通省近畿地方整備局福知山河川国道事務所、京都府河川課、綾部市、福知山市、

舞鶴市、アジア航測株式会社から種々の資料を提供して頂いた。記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 朝日新聞, 2014年5月19日付朝刊(第10版) 記事
- 2) Miwa, H., Kanda, K., Yamasaki, K., Ochi, T. and Muakami, H.: Observing dynamic state of river-mouth bar and its control in the Yuragawa River, *Proceedings of the 11th International Conference on Hydro-Science and Engineering, Vol.XI/CD-ROM, 2014.*
- 3) 神田佳一, 三輪 浩, 加登文学: 由良川河口地形の動態とその制御法に関する研究, 国土交通省平成23年度河川砂防技術研究開発公募 地域課題分野(河川) 研究成果報告書, 2012.
- 4) 川合 茂, 野木章平, 竹田一貴, 檜谷 治: 2004年台風23号による由良川の被害と洪水, 第60回土木学会年次学術講演会講演概要集, 第II部門(CD-ROM), pp. 127-128, 2005.
- 5) 芦田和男, 江頭進治, 青井博志: 豪雨時の山腹崩壊に関する資料解析的研究, 京都大学防災研究所年報, 第29号B-2, pp. 309-327, 1986.